



**TEKNILLINEN KORKEAKOULU**

**Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osasto**

**Sähköverkot ja suurjännitetekniikka**

## **Päämuuntajien jäähdytysjärjestelmät ja erillisjäähdytyksen optimointi**

**Jussi Palola**

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten Espoossa 2005.

**Työn valvoja**



**Matti Lehtonen**

Professori

TEKNILLINEN KORKEAKOULU

**Työn ohjaaja**



**Markku Hyvärinen**

Tutkimus- ja kehityspäällikkö

**Helsingin Energia**

---

## *Alkulause*

Olosuhteet tämän tutkimuksen tekemiseen ovat olleet ensiluokkaiset. Tutkimuspohjan arkkitehteinä toimineet Matti Lehtonen ja Markku Hyvärinen ovat täydet kiitoksensa ansainneet: yhteistyökuviot, resurssit ja ohjaus ovat suunniteltu osuvasti edustaen Suomen parhaimmistoa.

Asiantunteva ja ennen kaikkea yhteistyökykyinen Helsingin Energian henkilöstö on antanut hienon mahdollisuuden nuorelle työmiehelle. Tiedän, ettei tämä työ olisi puoliksikaan valmis ilman merkittävää panostanne. Kiitokset teille monille tekijöille, Oskari Patjas, Mika Hinkkanen, Jussi Innala, Tiina Kasari, Pauli Vanhala, Teemu Pohjola, Urpo Saastamoinen, Jyrki Riekkä, Merja Mikkonen, Hasse Nordman, Terho Seppi, Arto Ellilä, Juhani Viksten, Veli-Tapani Karhu, Jyrki Nieminen, Pekka Korpela, Risto Sepänen, Jaakko Juusti, Anitta Vähäkuopus, Ralf Böstman, Mauri Aroranta, Jaakko Juuse-la, Mauri Myllyniemi, Olavi Kortelainen, Aki Hämäläinen, Marja-Leena Pykälä, Antti Rautiainen, Reetta Ahola, Osmo Siirto, Anne Hyvärinen, Simo Nurmi sekä Jari Lintu-vuori.

Special thanks to Dejan Susa with whom I have had the pleasure of co-operation: you will be a fine doctor, an encourager you are already, there is no question about that matter.

Kiitokset jatkuvasta tuesta kuuluu perheelle: vanhemmille, sisarille ja veljille, kuin myös kaikille läheisille.

*Kunnia Kristukselle.*

*Jussi Palola Helsingissä 1.12.2004*





Tekijä:	Jussi Palola
Työn nimi:	Päämuuntajien jäähdytysjärjestelmät ja erillisjäähdytyksen optimointi
Sivumäärä:	102
Päivämäärä:	1. joulukuuta 2004

Osasto:	Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osasto
Professuuri:	S - 18 Sähköverkot ja suurjännitetekniikka

Työn valvoja:	Professori Matti Lehtonen
Työn ohjaaja:	Diplomi-insinööri Markku Hyvärinen

Sähköasemien päämuuntajat ovat sähköverkon luotettavan toiminnan kannalta tärkeitä vaikean korvattavuuden vuoksi. Niiden tilaa seurataan säännöllisin väliajoin ja kuormitusta jatkuvasti Helsingin Energiassa. Seurannan alla ovat 43:n muuntajan huippuöljyn lämpötila, kääminlämpötilakuvaaja, kuormitus sekä eriste- ja jäähdytysöljyyn lienneet kaasut. Näillä mittauksilla saadaan olennaista tietoa päämuuntajan tilasta.

Vuosina 2000-2003 analysoidut päämuuntajien öljynäytteet osoittavat hiilioksideja tai asetyleeniä kehittyneen yli suositusrajojen yhteensä kymmenessä päämuuntajassa. Työn tarkoituksena on perehtyä ongelmaan selvittäen syitä ja ratkaisuja. Tutkimusta varten Pasilan sähköasemalle suunniteltiin ja asennettiin mittauslaitteisto havainnollistamaan erillisjäähdytteisten päämuuntajien jäähdytysjärjestelmän toimintaa. Tulosten perusteella tehdään suositus muuntajien lämpötilariippuville asetteluarvoille. Tulevia sähköasemia varten selvitetään myös muuntajien vesijäähdytysjärjestelmän toimivuutta ja kustannuksia erityisesti maanalaisiin tiloihin asennetuille päämuuntajille.

Avainsanat: muuntaja, jäähdytys, öljyanalyysi, jäähdytysjärjestelmä, muuntajahäviöt, OFAF, ONAF, OFWF.

Author:	Jussi Palola
Name of the Thesis:	Optimizing power transformer's cooling system
Date:	1 <sup>st</sup> of December 2004
Number of Pages:	102
Department:	Electrical and Communications Engineering
Professorship:	S - 18 Power Systems and High Voltage Engineering
Supervisor:	Matti Lehtonen, Professor
Instructor:	Markku Hyvärinen, M. Sc.
<p>Substation main transformers have a major importance in energy distribution. All used electrical energy in Helsinki flows thru 43 power transformers. This is the reason for constant monitoring of power transformers conditions in Helsinki Energy. From every unit top-oil temperature, winding temperature image and loading are monitored. Dissolved gas analysis from transformer oil is the most important tool for long-term surveillance. With these measurements we can have information from conditions inside the transformer.</p> <p>The analysis of 2000-2003 main transformers oil samples, show carbon oxides and acetylene development over reference concentrations in ten transformers. The aim of this thesis is to find the reasons for this and to offer an conclusion with the explanation. Pasila substation is taken to closer surveillance on behalf of all oil forced air forced cooling systems with specific equipment for thermal modelling. The Main goal is to optimize thermal adjustments of OFAF cooling system. A closer observation will be made on new methods, such as water cooling for underground substations.</p>	
<p>Keywords: power transformer, cooling, dissolved gas analysis, transformer losses, OFAF, ONAF, OFWF.</p>	

## Sisällysluettelo

Alkulause.....	I
Tiivistelmä.....	II
Sisällysluettelo .....	IV
Merkinnät ja lyhenteet .....	VI
<b>1 Johdanto.....</b>	<b>1</b>
<b>2 Päämuuntajien seuranta ja kunnonvalvonta.....</b>	<b>2</b>
2.1 Käytönvalvontajärjestelmä.....	2
2.2 Muuntajaöljyn kaasuanalyysi.....	4
2.2.1 Hiilivetyjen muodostuminen muuntajaöljyssä.....	4
2.2.2 Hiilioksidien muodostuminen .....	7
2.2.3 Yksinkertaistettu analyysi ( IEC 599 ).....	8
2.2.4 Öljynäytteiden tulokset .....	12
2.3 Muuntajan lämpökuvaus .....	18
2.4 Hydran kaasuanalysaattori .....	19
2.5 Osittaispurkauksien mittaus .....	20
2.5.1 Sähkötekkinen mittaus .....	20
2.5.2 Akustinen mittaus.....	22
<b>3 Tehomuuntajien jäähdyttäminen .....</b>	<b>24</b>
3.1 Ikääntyminen ja lämpötila.....	24
3.2 Jäähdytysjärjestelmien lämpökäyttäytyminen .....	27
3.2.1 Esimerkkejä käyntilämpötiloista.....	29
3.2.2 Oil Natural Air Natural – ONAN.....	31
3.2.3 Oil Natural Air Forced – ONAF .....	33
3.2.4 Oil Forced Air Forced – OFAF .....	34
3.2.5 Oil Forced Water Forced – OFWF .....	35
3.2.6 Oil Natural Water Forced – ONWF .....	37
3.3 Muuntajan häviöt ja käyttölämpötila .....	37
<b>4 Päämuuntajien tutkimus .....</b>	<b>41</b>
4.1 Kohteen valinta .....	41
4.2 Päämuuntajan jäähdytysjärjestelmän mittaus .....	43
4.2.1 Referenssimittaus öljytasku- ja putki antureille.....	46
4.3 Tarkennettu mittaus käytönvalvontajärjestelmästä .....	48
4.4 Kuormitushäviöt.....	49
4.5 Virran särökerroin THD.....	52
4.5.1 Tankin lämpötila laser-mittarilla.....	53
4.6 Yhteenvedo mittausjärjestelyistä .....	55



<b>5</b>	<b>Mittaustulosten analyysi.....</b>	<b>57</b>
5.1	Käyttölämpötilan alentamisen vaikutus kaasun kehitykseen.....	57
5.2	Kuormituskoe ja muuntajan lämpötila.....	64
5.3	Jäähdytysjärjestelmän hullunkierto.....	65
5.4	Pitäjänmäen päämuuntajien jäähdytysjärjestelmä.....	66
<b>6</b>	<b>Jäähdytysjärjestelmän kunnossapito ja seuranta.....</b>	<b>68</b>
6.1	Radiaattorin tuulettimen käyttöikä.....	68
6.2	Jäähdytysjärjestelmän huoltaminen.....	69
<b>7</b>	<b>Jäähdytysjärjestelmien taloudellinen vertailu.....</b>	<b>70</b>
7.1	Laitteistokustannukset.....	70
7.2	Maanalainen jäähdytysjärjestelmä.....	74
7.2.1	Rakennuskustannukset OFAF -järjestelmälle.....	74
7.2.2	OFWF -jäähdytysjärjestelmän kustannukset.....	75
<b>8</b>	<b>Yhteenveto ja johtopäätökset.....</b>	<b>79</b>
8.1	Uudet arvot tuulettimien termostaateille.....	79
8.2	Jäähdytysjärjestelmän valinta.....	80
8.3	Tulevaisuuden jäähdytysjärjestelmä.....	81
	<b>Lähdeluettelo.....</b>	<b>82</b>
	<b>Keskustelut.....</b>	<b>84</b>
<b>Liitteet</b>	<b>.....</b>	<b>86</b>
1	Mittausjärjestelyt Pasilan sähköaseman päämuuntajille.....	87
2	Valvomokuvia mittauksia varten tehdyistä kytkennöistä.....	96
3	Kysymyksiä Pasilan muuntajien valmistajalle.....	98
4	Helsingin Energian eristeöljytutkimuksia 2003.....	102

## *Merkinnät ja lyhenteet*

$T_w$	Käämin lämpötilakuvaaja, laskennallinen arvo huippuöljyn lämpötilan ja kuormituksen funktiona.
Scada	Supervisory Control and Data Acquisition, käytönvalvontajärjestelmä
OFAF	Oil Forced Air Forced, muuntajan jäähdytysjärjestelmän pakotettu öljy- ja ilmakierto
ONAF	Oil Natural Air Forced, luonnollinen öljykierto ja pakotettu ilmakierto
OFAN	Oil Forced Air Natural, pakotettu öljykierto ja luonnollinen ilmakierto
OFWF	Oil Forced Water forced, pakotettu öljy- ja vesikierto
SQL	SEQUEL – relaatiotietokantojen ohjelmointikieli
THD	Total Harmonic Distortion
ppm	Part Per Million
IEC	International Electrotechnical Commission
CF-kortti	Muistikortti mittauslaitteistoon
$CH_4$	Metaani-kaasun kemiallinenkaava
$C_2H_6$	Etaani
$C_2H_4$	Etyleeni
$C_2H_2$	Asetyleeni
$CO_2$	Hiilidioksidi
$CO$	Hiilimonoksidi
$O_2$	Happi
$N_2$	Typpi
$H_2$	Vety
TCG	Muuntajaöljyn palavat kaasut
GWh	Gigawattitunti = 3,6 terajoulea
kV	Kilovoltti
$\mu l / l$	Micro litraa kaasua yhdessä litrassa öljyä
$kJ / mol$	Molekyylin sidosenergia yhtä moolimäärää kohti
$p_{kok}(I)$	Muuntajan kokonaishäviöt virran funktiona per unit – arvoina
$P_k$	Kuormitushäviöt nimellisvirralla
$P_t$	Muuntajan tyhjäkäyntihäviöt

---

$P$	Teho (Wattia)
$\rho$	Aineen tiheys $\frac{kg}{m^3}$
$\delta$	Virtausnopeus $\frac{m^3}{s}$
$c$	Ominaislämpökapasiteetti $\frac{Ws}{kg \cdot K}$
$\vartheta_a$	Ympäristön ilman lämpötila
$\Delta \vartheta_{o-a}$	Jäähtyvän öljyn ja lämpenevän ilman keskiarvoinen lämpötilaero
$\Delta \vartheta_{CO}$	Radiaattorin öljyn lämpötilagradientti
$\Delta \vartheta_{WO}$	Öljyn lämpötilagradientti käämissä
$P_{Kok}$	Muuntajan kokonaishäviöt watteina
$P_{TotW}$	Kokonaiskäämihäviöt
$P_{DC}$	Käämin resistiiviset häviöt, kuparihäviöt
$P_{Eddy}$	Käämin pyörrevirtahäviöt
$\beta$	Lämpötilakertoimen käänteisarvo, kuparille $234,5^\circ C$
$\theta_{75^\circ C}$	Referenssilämpötila kelvineissä 348,15 K
$\theta_T$	Lämpötila, Kelviniä K



## 1 Johdanto

Helsingin alueen sähkönkulutus on noin 5 % Suomen sähkönkulutuksesta. Vuonna 2003 sähköenergiaa siirrettiin Helsingin Energian asiakkaille 4137 GWh ja vuodelle 2004 sähköenergian siirron kasvuennuste on noin 2-3 %. Lähes kaikki sähköenergia siirtyy 110 kV:n siirtoverkosta sähköasemille, joita Helsingin Energialla on 20. Päämuuntaja on sähköaseman keskus, jossa siirtojännite muunnetaan keskijännitteeksi, joka on jakealueesta riippuen 10 tai 20 kV. Kantakaupungin keskijännite on historiallisista syistä 10 kV, muualla Helsingissä 20 kV. Lähes kaikki Helsingin alueella käytetty sähköenergia muunnetaan sähköasemien päämuuntajilla, joita <sup>1</sup> Helenillä <sup>2</sup> on yhteensä 43 yksikköä. Tehomuuntajan tyypillinen hankintahinta on noin 300 000 euroa, joten sen kunto on tärkeä talouden ja sähkön jakelun luotettavuuden kannalta. /1/ /21/

Sähköasemien päämuuntajien tilaa seurataan jatkuvasti. Sähkövalvomossa tarkkaillaan päämuuntajan kuormitusta, huippuöljyn lämpötilaa, käämin lämpötilakuvaajan arvoa ja muutamassa tapauksessa myös kaasumittauslaitteisto Hydranin arvoa. Kaikkien päämuuntajien virta- ja kuormitustiedot tallennetaan tunnin keskiarvoina ja osa päämuuntajista on kuormitusmittauksen lisäksi myös huippuöljyn lämpötilaseurannassa. Tärkeä osa ennakoivasta kunnonvalvonnasta on muuntajan öljyyn liuenneiden kaasujen analyysi; säännöllisin väliajoin otetut näytteet muuntajan jäähdytys- ja eristeöljystä kertovat muuntajan tilasta paljon pitkällä aikavälillä. Liuenneista kaasuista ja niiden konsentraatioista voidaan suuntaa-antavasti seurata sähkön jakelun toimivuuden kannalta olennaisen yksikön toimintaa. Kaasuanalyysit ovat osoittaneet muutamien päämuuntajien kehittävän erikoisesti hiilioksideja yli kokemuseräisten suositusrajojen. /14/ /23/ /24/

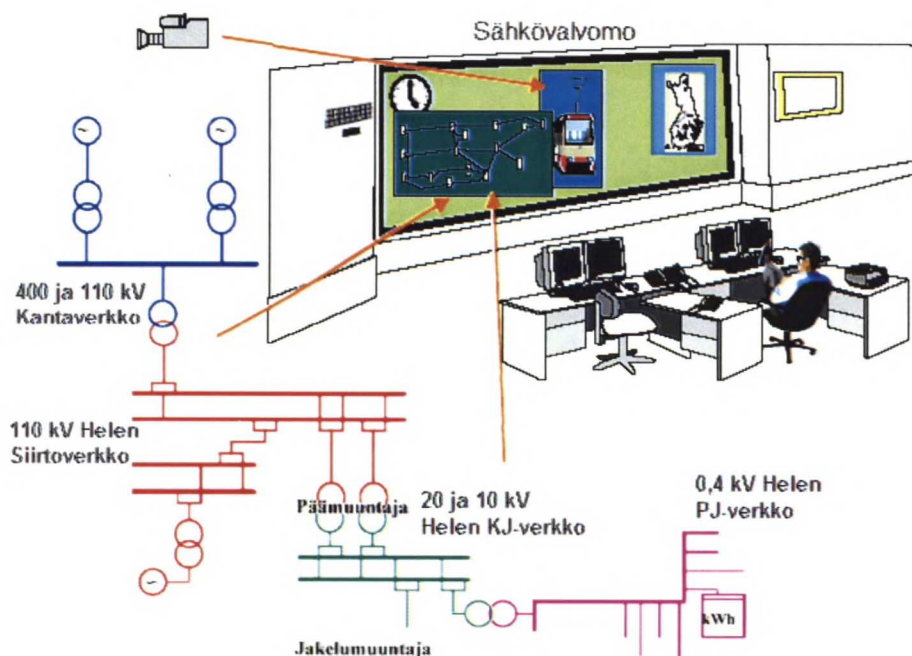
Tämän työn tarkoituksena on perehtyä olennaisiin kysymyksiin, jotka koskevat erillisjäähdytteisen muuntajan jäähdytysjärjestelmän käyttöä ja syitä kaasun muodostumiseen. Tavoitteena on yhtenäistää Helsingin Energian päämuuntajien jäähdytysjärjestelmän lämpötilariippuvia asetteluarvoja. Tarkasteltavana ovat myös eri jäähdytysmenetelmät taloudelliselta ja tekniseltä kannalta, erityistapauksena Helsingin keskustaan suunnitella olevaan maanalaiseen sähköasemaan. Tutkimusta varten suunniteltiin ja asennettiin tarkemmat mittausjärjestelyt Pasilan sähköaseman molemmille päämuuntajille havainnollistamaan jäähdytysjärjestelmän toimintaa.

## 2 Päämuuntajien seuranta ja kunnonvalvonta

Sähköverkon muuttuvia suureita mitataan reaaliajassa sekä tallennetaan pitkällä aikavälillä, mittaustarkkuuden ja näytevälin riippuessa kohteen toiminnan luotettavuuden edellyttämästä painoarvosta ja suureen muutosnopeudesta. Verkon toiminnan kannalta olennaiset tiedot tulevat suoraan sähkövalvomoon, kuten kaikki siirtoverkon ja keski-jännitelähtöjen virrat ja jännitteet. Nämä tiedot tallennetaan myös Helsingin Energian palvelimille pitkäaikaisempaa tarkastelua varten, kuten tässä tutkimuksessa tarkasteltavat 13:n päämuuntajan tunnin välein tallennetut lämpötilojen tiedot.

### 2.1 Käytönvalvontajärjestelmä

Scada - lyhennelmä tulee sanoista: Supervisory Control and Data Acquisition, joka suomeksi tarkoittaa käytönvalvontajärjestelmää. Helsingin Energian verkossa on yli 20000 datapistettä, jonka perusteella reaaliaikainen kuva siirtoverkon ja sähköasemien tilasta muodostetaan sähkövalvomoon. Valvontajärjestelmä kerää sähköverkon prosessitietoa ja välittää hälytykset asetusrajojen ylittyessä. Mittaustietoja käytetään laskenta-sovelluksiin, joista esimerkkinä tehojakolaskenta muutostilanteiden mallintamista varten.



Kuva 1 Sähköverkon käytönvalvontajärjestelmän periaatekuva. /31/



Käytönvalvontajärjestelmä kerää tietoa ala-asemilta, joita on yhteensä 25: jokaisella sähköasemalla vähintään yksi ja laajimmilla, kuten Pitäjänmäessä, on kaksi ala-asemaa (Remote Terminal Unit). Jokainen näistä pystyy välittämään tuhannen datapisteen arvon valvomoon valokuidulla tai kaapelilla. Verkon tilannekuva muodostuu 23500 datapisteen välittämästä informaatiosta, joista noin kymmenen tuhatta on prosessiarvoista laskettu. /31/

Tällä hetkellä Scada -järjestelmään tulevat lämpötilatiedot taulukon 1 päämuuntajilta, joita on yhteensä 13.

*Taulukko 1 Päämuuntajien sähköiset arvot ja jäähdytysmenetelmä.*

Muuntaja	Valmistus vuosi	Jäähdytys tapa	Näennäisteho [MVA]	Ensiö In [A]	Toisio In [A]	Ensiö Un [kV]	Toisio Un [kV]
Kamppi M1	1970	OFAF	30,0	151	1 650	115	10,5
Kamppi M2	1971	OFAF	30,0	151	1 650	115	10,5
Viikinmäki M3	1982	ONAF	31,5	165	866	110	21,0
Pitäjänmäki M1	2001	ONAF	40,0	201	1 100	115	21,0
Pitäjänmäki M2	2001	ONAF	40,0	201	1 100	115	21,0
Pitäjänmäki M3	1982	ONAF	31,5	165	866	110	21,0
Kasarmitori M1	1963	OFAF	31,5	165	1 732	110	10,5
Myllypuro M1	1976	ONAF	40,0	210	1 100	110	21,0
Myllypuro M2	1976	ONAF	40,0	210	1 100	110	21,0
Pasila M1	2000	OFAF	40,0	201	1 100	115	21,0
Pasila M2	2000	OFAF	40,0	201	1 100	115	21,0
Suurmetsä M2	1995	OFAF	40,0	201	1 100	115	21,0
Suurmetsä M1	1995	OFAF	40,0	201	1 100	115	21,0

Jokainen päämuuntaja on varustettu huippuöljyn lämpötila-anturilla ja käämin lämpötilakuvaajalla, jossa huippuöljyn lämpötilan lisäksi on huomioitu muuntajan kuormitus.



*Kuva 2 Pasilan muuntajan M2 kannen anturit huippuöljyn lämpötilalle ja kääminlämpötilankuvaajalle.*



Käämin lämpötilakuvaajan arvo lasketaan huippuöljyn ja kuormituksen funktiona seuraavasti:

$$T_w = T_o + \Delta g_r \cdot K^y \cdot H \quad (15)$$

missä

$T_w$  = Käämin lämpötilakuvaaja

$T_o$  = Huippuöljyn lämpötila

$\Delta g_r$  = Käämin nimellinen lämmön nousu huippuöljyn lämpötilasta

$K$  = Kuormituaste p.u. arvona

$H$  = Kerroin käämin lämpötilalle (IEC 354)

$y$  = eksponentti kuormitukselle

## 2.2 Muuntajaöljyn kaasuanalyysi

Muuntajaöljyn tärkeimmät tehtävät ovat toimia eristeenä ja hoitaa lämmön siirtoa sekä välillisesti antaa lisätietoa muuntajan kunnosta. Muuntajan ollessa käytössä kehittyvät eriste- ja jäähdytysöljyssä kaasuja lämpötilan funktiona. Mahdollinen lämpötila-alue muuntajan sisällä on laaja: aina pakkasen puolelta muutamiin tuhansiin celsius-asteisiin. Korkein mahdollinen lämpötila muuntajassa on tehoa kuljettavan valokaaren palaessa. Tällöin lämpötila kohoaa läpilyöntipaikassa tuhansiin asteisiin, jolloin alkaa muodostua asetyleneä. Esimerkkinä paikallisesta termisestä viasta olkoon käämin paperieristeen kuumeneminen ylikuormituksen tai riittämättömän paikallisen jäähdytyksen seurauksena. Käämien sisällä olevien jäähdytyskanavien heikko öljynvirtaus tai tukkeutuminen aiheuttaa myös paikallista ylikuumenemista, jolloin paperin hitaasti hajotessa kehittyvät hiilioksideja CO:a ja CO<sub>2</sub>:a. Seuraavaksi syvennyttään muutamalla eri mallilla jäähdytysöljyyn liuenneiden kaasujen analyysiin soveltaen lopuksi vallitsevaa IEC standardia ja Fortumin suositusrajoja Helsingin Energian päämuuntajien jäähdytysöljynäytteisiin.

/25/ /3/

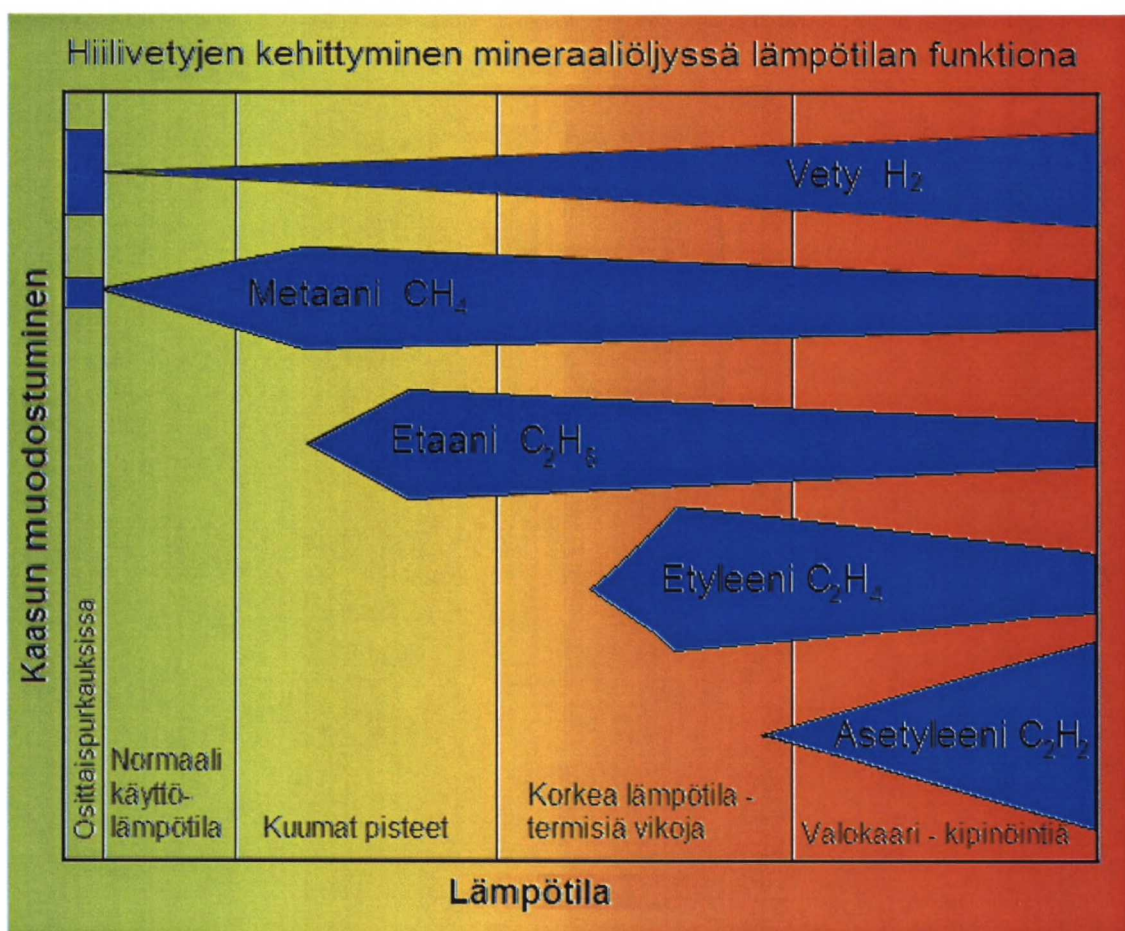
### 2.2.1 Hiilivetyjen muodostuminen muuntajaöljyssä

Kaasun muodostumiseen eriste- ja jäähdytysöljyssä vaikuttavat monet tekijät; muuntajan käyttöhistoria, kuormitustilanne, eristeen mitoitus ja sen kosteus, käyntilämpötila sekä vian tarkka sijainti. Jatkuvassa näytteiden seurannassa huomioon ottaen muut

olennaiset tekijät, kuten kuormitusaste ja käyttöikä, saadaan käyttökelpoista tietoa mahdollisen vian kehittymisestä. /3/

Taulukko 2 Seurannan alla olevat kaasut ja niiden kemialliset kaavat.

Kaasu	Kemiallinen kaava
Metaani	$\text{CH}_4$
Etaani	$\text{C}_2\text{H}_6$
Etyleeni	$\text{C}_2\text{H}_4$
Asetyleeni	$\text{C}_2\text{H}_2$
Vety	$\text{H}_2$
Happi	$\text{O}_2$
Typpi	$\text{N}_2$
Hiilimonoksidi	$\text{CO}$
Hiilidioksidi	$\text{CO}_2$



Kuva 3 Hiilivetyjen kehittyminen muuntajaöljyssä lämpötilan funktiona. /3/



Hiilivety-molekyylin hajotessa muodostuu vapaita hiilivety-radikaaleja kuten: H, CH, CH<sub>2</sub>, CH<sub>3</sub>. Radikaalit yhdistyvät hiilivetykaasuiksi; lämpötila ja ympäröivät aineet vaikuttavat tapahtumasarjan lopputulokseen (kuva 3). Matalilla vikalämpötiloilla muodostuu metaania ja vetyä, metaanin määrän ollessa vallitseva. Lämpötilan kohotessa alkaa muodostua etaania ja samalla metaanin muodostus hidastuu. Vieläkin korkeamassa lämpötilassa etyleenin muodostuksesta tulee hallitseva. Seuraavaksi asteikolla on asetyleeni, jota muodostuu yhä enemmän lämpötilan noustessa. /3/

Kuvaajan lämpötila-akseli on jaettu termisiin vikatyyppeihin. Normaalin käyttölämpötilan yläraja on 140 °C, kuumat pisteet nousevat 250 °C lämpötilaan ja korkeat termiset viat lähestyvät 1000 °C. Etyleeni-kaasun muodostuminen alkaa noin 700 °C lämpötilassa. Eri hiilivetyjen määrien suhteista voidaan tehdä diagnoosi teorialla, jonka ovat esittäneet Messrs I. Davies ja P. Burton vuonna 1972 (Kaavat 1,2,3 ja 4). /3/

$$1. \frac{CH_4}{H_2} \quad 2. \frac{C_2H_6}{CH_4} \quad 3. \frac{C_2H_4}{C_2H_6} \quad 4. \frac{C_2H_2}{C_2H_4}$$

Lukujen tulkintaa kehittänyt R. R. Rogers on tehnyt seuraavat diagnoosi-taulukot:

Taulukko 3 Kaasujen konsentraation koodi vaihteluväleillä. /3/

Suhdeluku	Vaihteluväli	Koodi
$\frac{CH_4}{H_2}$	< 0,1	5
	0,1 < välillä <1,0	0
	1,0 < välillä <3,0	1
	≥ 3,0	2
$\frac{C_2H_6}{CH_4}$	< 1,0	0
	≥ 1,0	1
$\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$	< 1,0	0
	1,0 < välillä <3,0	1
	≥ 3,0	2
$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	< 0,5	0
	0,5 < välillä <3,0	1
	≥ 3,0	2



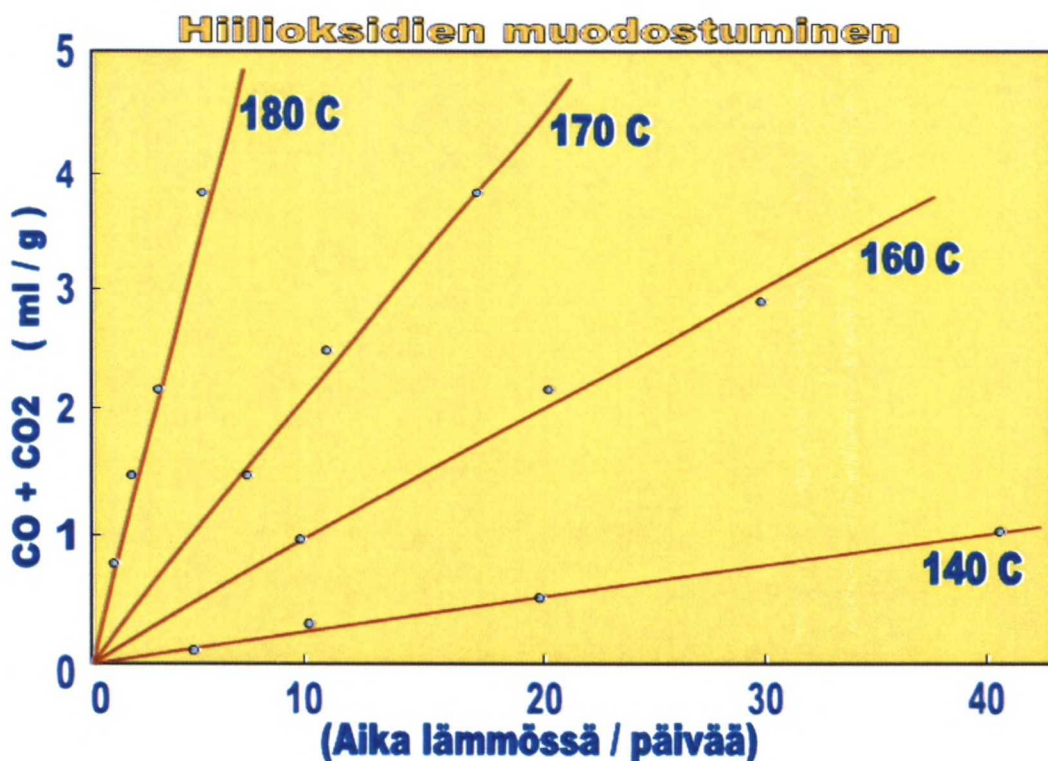
Taulukko 4 Kaasujen suhdeluvuista määritellyt diagnoosit. /3/

$\frac{CH_4}{H_2}$	$\frac{C_2H_6}{CH_4}$	$\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$	$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	Diagnoosi
0	0	0	0	Normaali vanhentuminen
5	0	0	0	Osittaispurkauksia
1 tai 2	0	0	0	Pientä ylikuumenemista - alle 150
1 tai 2	1	0	0	Ylikuumentunut - 150 - 200
0	1	0	0	Ylikuumentunut - 200 - 300
0	0	1	0	Johteen ylikuumeneminen
1	0	1	0	Käämin pyörrevirrat, ylikuumentuneet liitokset
1	0	2	0	Pyörrevirrat tankissa ja rautasydämessä
0	0	0	1	Kipinöintiä
0	0	1 tai 2	1 tai 2	Tehollinen valokaari
0	0	2	2	Jatkuvaa kipinöintiä kelluvaan potentiaaliin
5	0	0	1 tai 2	Tasainen osittaispurkaus

### 2.2.2 Hiilioksidien muodostuminen

Hiilioksidien muodostuminen lisääntyy voimakkaasti lämpötilan noustessa. Kun kaasujen  $\frac{CO_2}{CO}$ -suhdeluku on alle kolme, niin todennäköisesti muuntajassa tapahtuu paperi-  
rieristeen jonkin asteista hiiltymistä. Ilmasta voi myös absorboitua hiilidioksidia  
erikoisesti vapaasti hengittävissä muuntajissa, joissa ilmasta öljyyn liuennut hiilidioksi-  
di voi nousta arvoon  $300 \frac{\mu l}{l}$ . /6/

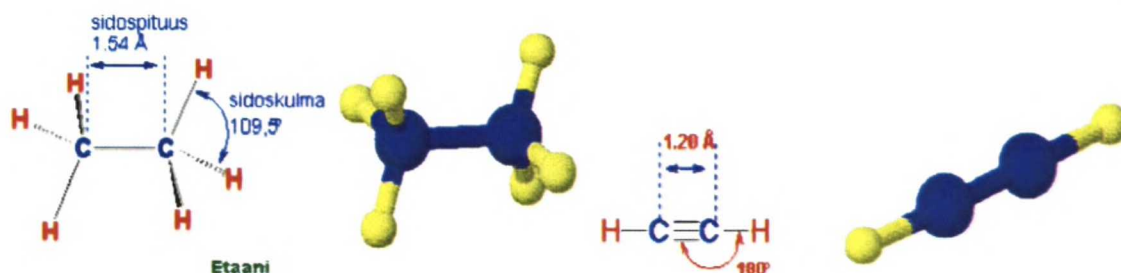
Cigressä 1990 esiintynyt ryhmä tutki hiilioksidien muodostumisen lämpötilariippuvuut-  
ta. He saivat seuraavanlaisia mittaustuloksia neljässä eri lämpötilassa (Kuva 4). /9/



Kuva 4 Hiilimonoksidin ja -dioksidin muodostuminen ajan funktiona neljässä eri lämpötilassa. /9/

### 2.2.3 Yksinkertaistettu analyysi ( IEC 599 )

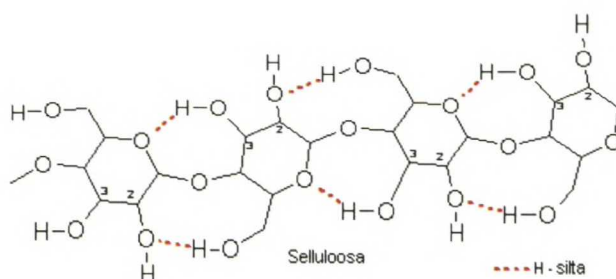
Molekyylisidosten purkaminen vaatii energiaa, jonka määrä riippuu molekyylin atomien ominaisuuksista. Pienillä energiatasoilla, joilla esiintyy osittais- ja koronapurkauksia, hajoavat hiili- ja vetyatomien väliset molekyylisidokset. Reaktio vaatii energiaa  $338 \text{ kJ/mol}$ . Metaani-molekyylissä on hiili- ja vetyatomien välinen sidos. Suuremmat vikaenergiatilat tai korkeammat lämpötilat aiheuttavat hiiliatomien välisten sidosten hajottamisen. Yksinkertainen hiiliatomien välinen sidos, joka löytyy muun muassa etaani-molekyylissä, tarvitsee  $607 \text{ kJ/mol}$  hajotakseen. Kaksinkertaisen etyleeni-molekyylin hiili-hiili-sidoksen energiamäärä on  $720 \text{ kJ/mol}$  sekä kolminkertaisen asetyleeni-molekyylissä esiintyvän sidosen energia on  $960 \text{ kJ/mol}$ . /6/



Kuva 5 Etaanin ja asetyleenin molekyytirakenteet /11/.

Lämpötilat eri kaasujen muodostumiseen vaihtelevat, mikä on selitettävissä kvanttifyysiikan avulla: lämpöliike eri molekyyille vaihtelee ja nopeus löytyy tietyltä todennäköisyysväliltä. Esimerkiksi jo 200 °C lämpötilassa muodostuu jonkin verran etyleenimolekyyliä, vaikka pääosin muodostuminen alkaa noin 500 °C:n lämpötilassa. Molekyylien nopeus on hajautunut lämpötilasta riippuvalle välille ja tietyllä todennäköisyydellä nopeimmat molekyylit törmäävät energialla muodostaen uuden tai hajottaen sidoksen. /6/

Muuntajassa on paljon puurakenteita ja paperia eristeissä. Edelliset koostuvat pitkälti polymeeriketjuista, jotka sisältävät ennen kaikkea heikkoja hiili-happi molekyyლისidoksia, anhydroglukoosi -renkaita ja glykolyysi -sidoksia. Nämä sidokset ovat termisesti epävakaita kuin hiilivetyjen sidokset, siitä johtuen niitä muodostuu jo alemmissa lämpötiloissa. Luonnon glukoosipolymeeriketjun hajotessa muodostuu vettä. Merkittävä polymeeriketjujen hajoaminen tapahtuu 105 °C:n ja sitä ylemmissä lämpötiloissa ja täydellinen hiiltyminen 300 °C:n lämpötilassa. /6/



Kuva 6 Glukoosipolymeeriketjun eli selluloosan molekyytirakenne /12/.

Hiilimonoksidin, dioksidin ja veden muodostuminen on vallitsevaa hiilivetyjen ja furaanisten yhdisteiden rinnalla, jälkimmäisten pääosin muodostuessa 250 – 500 °C:n



lämpötiloissa /34/. Oksidien muodostuminen on riippuvainen lämpötilan lisäksi myös öljyn happi-pitoisuudesta ja paperin kosteudesta. /6/

Öljyn hapettuessa muodostuu hiilioksideja, jotka tällä tavoin syntyen saavuttavat pitkän ajan kuluessa merkittävän pitoisuuden. Kaasuja voi myös muodostua esimerkiksi metallin ruostuessa sekä muissa kemiallisissa reaktioissa teräksen tai muiden suojaamattomien pintojen kanssa. Esimerkiksi alkyidi-pohjaiset suojamaalit muuntajan sisällä voivat reagoida öljyn kanssa kehittäen kaasua. Edellä mainittujen vaikutus huomataan teke-mällä kaasuanalyysi ennen uuden muuntajan käyttöönottoa. /6/

Tarkempi laskenta suositellaan tehtäväksi, jos jonkun kaasun määrä ylittää tyypillisen arvon. IEC on analysoinut 15:n verkkoyhtiön yli 15000 muuntajaa määrittääkseen 90 % tyypillisen vaihteluvälin kaasujen konsentraatiossa. Tutkimuksessa on huomioitu kaikki muuntajat jäädytystavasta ja rakenteesta riippumatta. Mukana on siis muuntajia läm-pimistä maista, jotka kasvattavat kaasujen konsentraatiovaihteluvälin ylärajoja. Samassa tutkimuksessa ovat myös teollisuuden tehomuuntajat, joita käytetään yleisesti suurem-milla kuormilla kuin verkkoyhtiöiden päämuuntajia. Konsentraatio-arvot ovatkin huo-mattavasti suurempia kuin Fortumin suositusarvot, jotka perustuvat Imatran Voiman aikaisiin tutkimuksiin suomalaisesta tehomuuntajakannasta. /6/

Taulukko 5 Fortumin suositusrajat tehomuuntajan öljyn kaasupitoisuuksille (µl/l)./18/

Muuntajan ikä	H <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>
Alle 2 vuotta	≤100	≤500	≤10000	≤100	≤100	≤150	≤10
Yli 7 vuotta	≤150	≤1000	≤15000	≤200	≤200	≤300	≤20

Taulukko 6 IEC:n tutkimuksen 15000 muuntajan konsentraation 90 % vaihteluväli (µl/l). /6/

Muuntaja tyyppi	H <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>
Ei yhteyttä käämikytkimeen	60-150	540-900	5100-13000	40-110	50-90	60-280	3-50
Yhteys käämikytkimeen	75-150	400-850	5300-12000	35-130	50-70	110-250	80-270



Yksinkertaistetun mallin vikatyyppejä on kuusi, jotka päätellään kolmesta suhdeluvusta, jotka ovat yhtä vaille samat kuin Messrs I. Davies ja P. Burton vuonna 1972 julkaisivat (Kaavat 1,3 ja 4). /6/

$$1. \quad \frac{CH_4}{H_2}$$

$$3. \quad \frac{C_2H_4}{C_2H_6}$$

$$4. \quad \frac{C_2H_2}{C_2H_4}$$

Taulukko 7 Vikadiagnoosi muuntajaöljyyn liuenneiden kaasujen suhteille. /6/

Vikatyyppi	$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	$\frac{CH_4}{H_2}$	$\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$
Osittaispurkauksia	$M^*$	$< 0,1$	$< 0,2$
Purkauksia, alhainen energia	$> 1$	$0,1 - 0,5$	$> 1$
Purkauksia, korkea energia	$0,6 - 2,5$	$0,1 - 1$	$> 2$
Terminenvika $t < 300^\circ C$	$M^*$	$> 1 \quad m^*$	$< 1$
Terminenvika $300^\circ C < t < 700^\circ C$	$< 0,1$	$> 1$	$1 - 4$
Terminenvika $t > 700^\circ C$	$< 0,2$	$> 1$	$> 4$
$M^* =$ arvo ei ole merkitsevä			

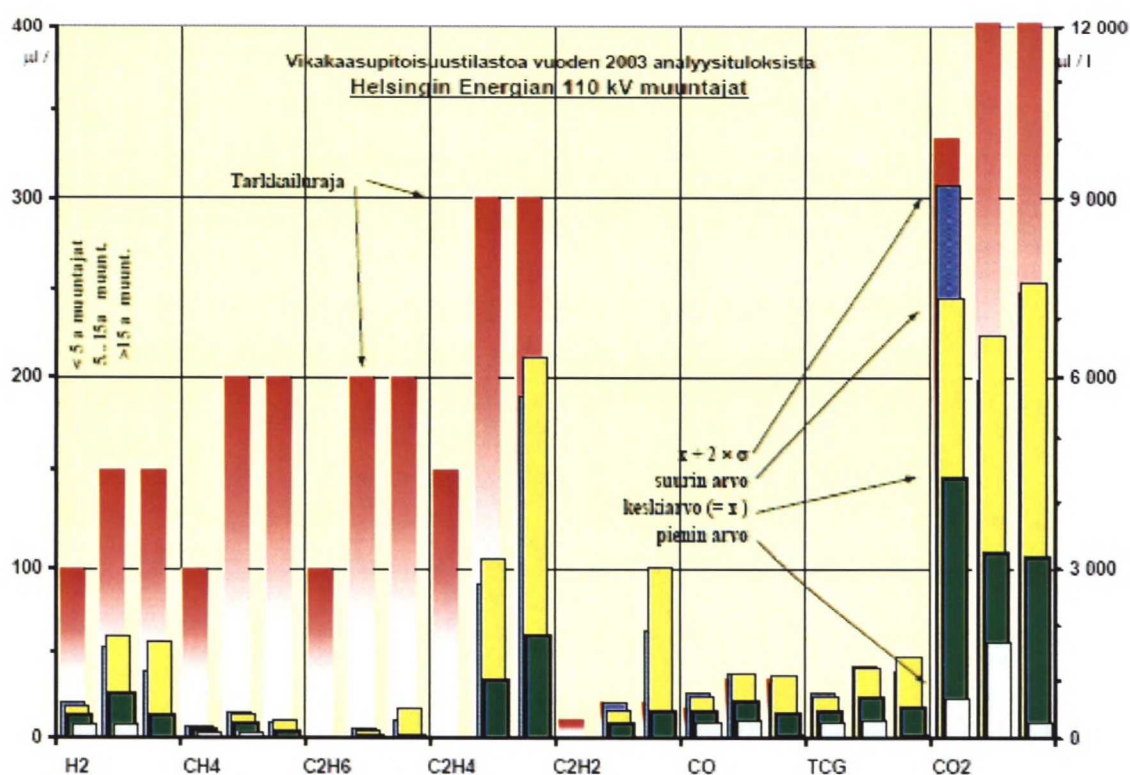
Taulukko 8 Vikadiagnoosin yksinkertaistettu malli. /6/

Vikatyyppi	$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	$\frac{CH_4}{H_2}$
Osittaispurkauksia		$< 0,2$
Purkauksia	$> 0,2$	
Lämpövika	$< 0,2$	

Kun yksinkertaistettu malli antaa viittauksia viasta, niin on hyvä käyttää tarkempaa menetelmää analysoimiseen (taulukko 5). Esimerkiksi Pasilan päämuuntajalla  $\frac{CH_4}{H_2}$  -suhdeluku on eräässä mittaustuloksessa alle 0,2, mikä antaisi viitteitä osittaispurkauksista. Tarkemman taulukon soveltaminen käyttää tarkentavana tietonaan osittaispurkauksia määritettäessä  $\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$  -suhdelukua. IEC:n perusteella ei ole syytä huoleen kahdesta syystä: kaasupitoisuudet eivät ole ylittäneet normaaleja rajoja (taulukko 4) sekä suhdeluvut eivät ole minkään vikatyypin mukaisia (taulukko 5). Pasilan muuntajien kaasuanalyysituloksia löytyy liitteestä seitsemän.

## 2.2.4 Öljynäytteiden tulokset

Päämuuntajista otetaan öljynäytteitä säännöllisin väliajoin, riippuen kohteen kunnosta, jota seurataan kolmen kuukauden välein kannettavalla laitteistolla. Normaalisti tarkemmat öljyanalyysit tehdään kahden vuoden välein. Jos kannettava analyysilaitteisto mittaa epänormaalia kaasujen kehitystä, tehdään tarkempia öljyanalyyskejä useammin. Näytteet toimitetaan Fortum Servicen laboratorioon, jossa määritetään öljyyn liuenneet hiilivedyt, hiilioksidit ja typpi- ja happi-pitoisuudet. Päämuuntajia analysoidaan kolmessa ikäryhmässä, alle 5, 5-15 ja yli 15 vuotta käytössä olleet muuntajat, sillä tilaa tarkkaillaan suhteessa käyttöikänsä. Kuvassa 7 jokaiselle mitatulle kaasulle on kolme pylväsryhmää käyttöiän perusteella. Jokaisessa ryhmässä on piirretty kyseisen kaasun tarkkailuraja punaisella, suurin mitattu arvo keltaisella ja keskiarvo vihreällä. Sininen pylväs tulee 90-luvun tilastollisesta menetelmästä kuvata kaasun kehitystä aritmeettisen keskiarvon ja hajonnan avulla /34/. /14/

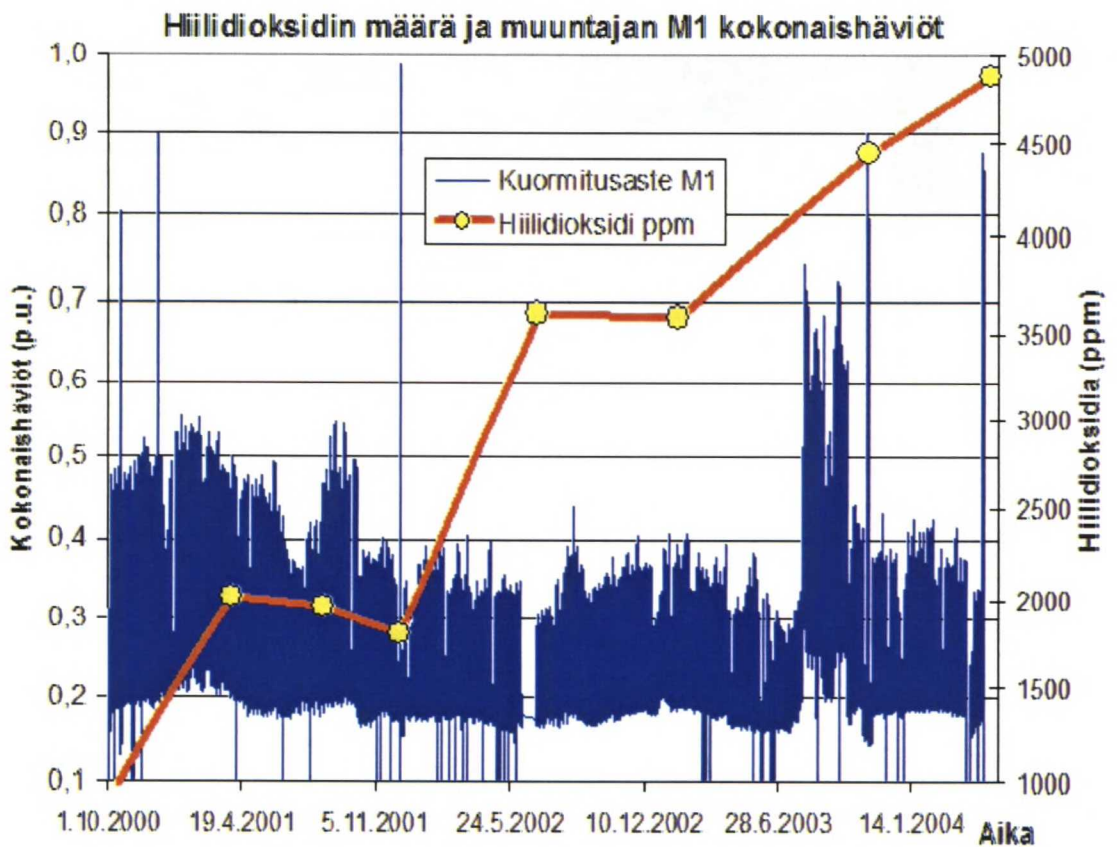


Kuva 7 Helsingin Energian päämuuntajien kaasuanalyysitulasto vuodelta 2003. /14/

Hiilivedyistä asetyleeniä on kehittynyt 15 vuotta vanhemmissa muuntajissa yli Fortumin tarkkailurajan, joka yllä olevassa taulukossa on 20 ppm. Yksityiskohtaisemmin tarkkailuraja käyttöiältään alle seitsemän vuoden muuntajalle on 10 ppm. IEC:n vastaa-



vat 90 % vaihteluvälit ovat 3-50 ppm muuntajalle, jossa ei ole yhteyttä käämikytkimeen ja 80-270 ppm, joilla tämä yhteys on. Missään muuntajassa ei ylittynyt IEC:n jälkimmäinen vaihteluväli korkeimman pitoisuuden ollessa 100 ppm Suvilahden päämuuntajassa M1 11.11.2003. Kaikissa 2003 vuoden asetyleenikonsentraation Fortumin suositusarvon ylityksissä, joita oli yhteensä viisi, on kyseessä yhteinen paisuntasäiliö käämikytkimen kanssa. /14/



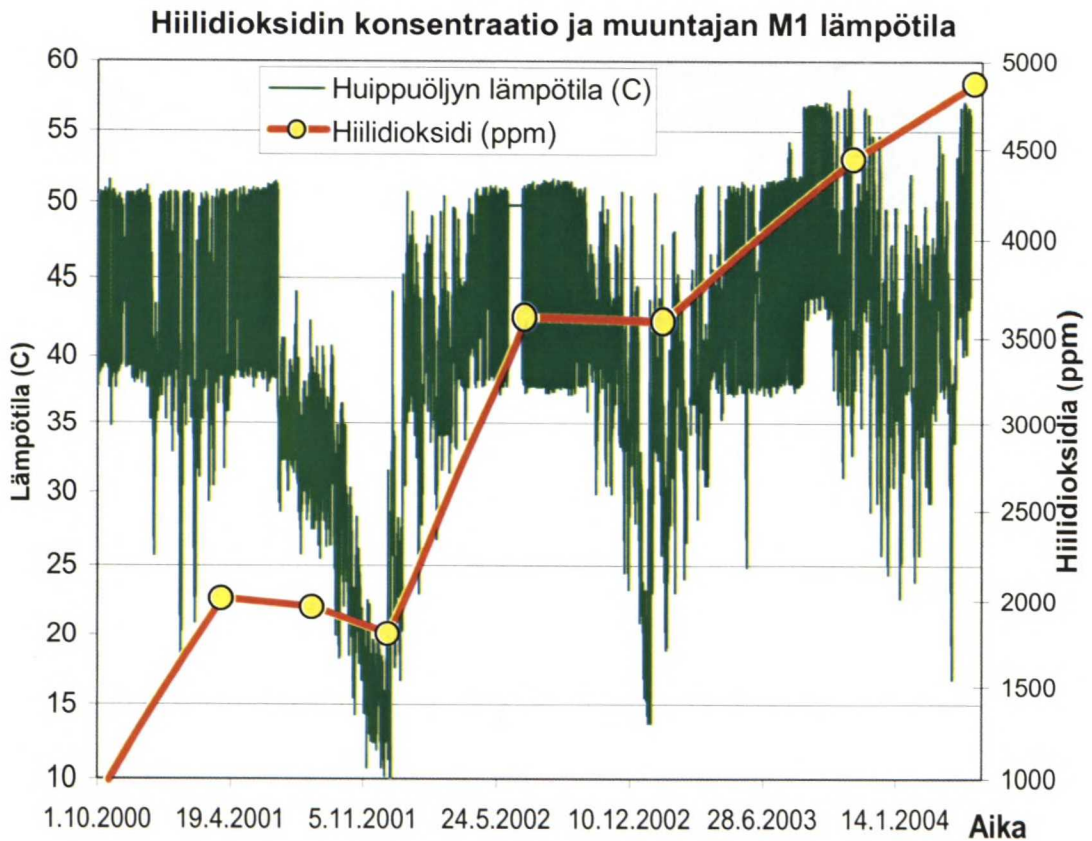
Kuva 8 Hiilidioksidin kehitys ja kokonaishäviöt Pasilan päämuuntajalla M1 ajan funktiona.

Kuvaajassa on kuormitusaste Pasilan päämuuntajalta M1 sinisenä viivana ja keltaiset pisteet kertovat öljynäytteistä mitatun hiilidioksidi-pitoisuuden (Kuva 8). Kokonaishäviöt ovat laskettu kuormitusvirran funktiona (Kaava 5) olettaen jännitetasojen pysyvän samoina ja ilman kuormitushäviöiden lämpötila-korjausta, sillä lämpötilatietoja löytyy vasta vuodesta 2002 eteenpäin. Lämpötilan vaikutus on muutamia prosentteja, tässä tapauksessa korkeintaan noin viisi prosenttia. /28/



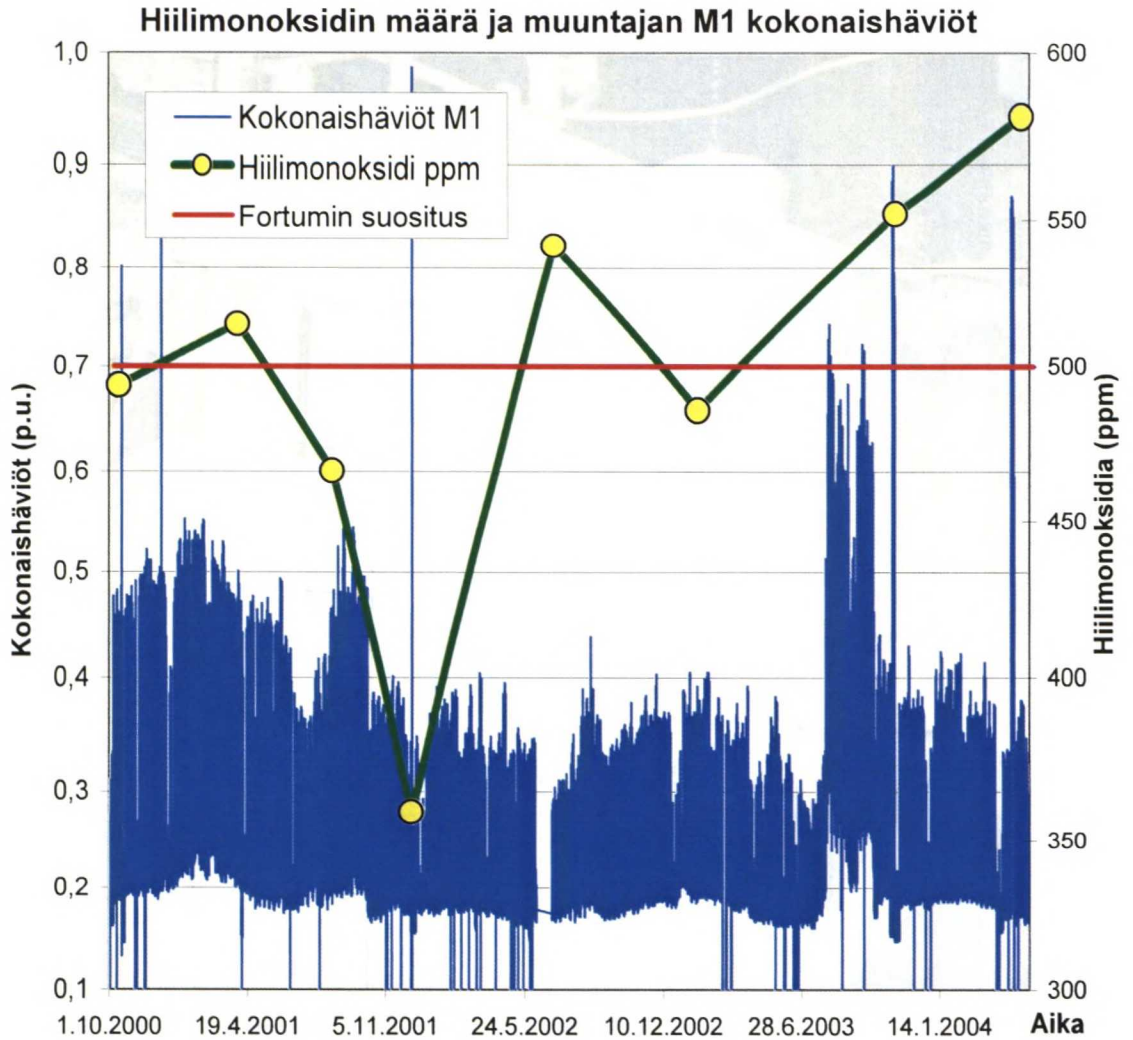
$$p_{kok}(I) = \frac{\left(\frac{I}{I_N}\right)^2 P_k + P_t}{P_{kok}} \quad (5)$$

missä  $p_{kok}(I)$  = Kokonaishäviöt virran funktiona p.u. – arvoina  
 $P_k$  = Kuormitushäviöt nimellisvirralla  
 $P_t$  = Tyhjäkäyntihäviöt



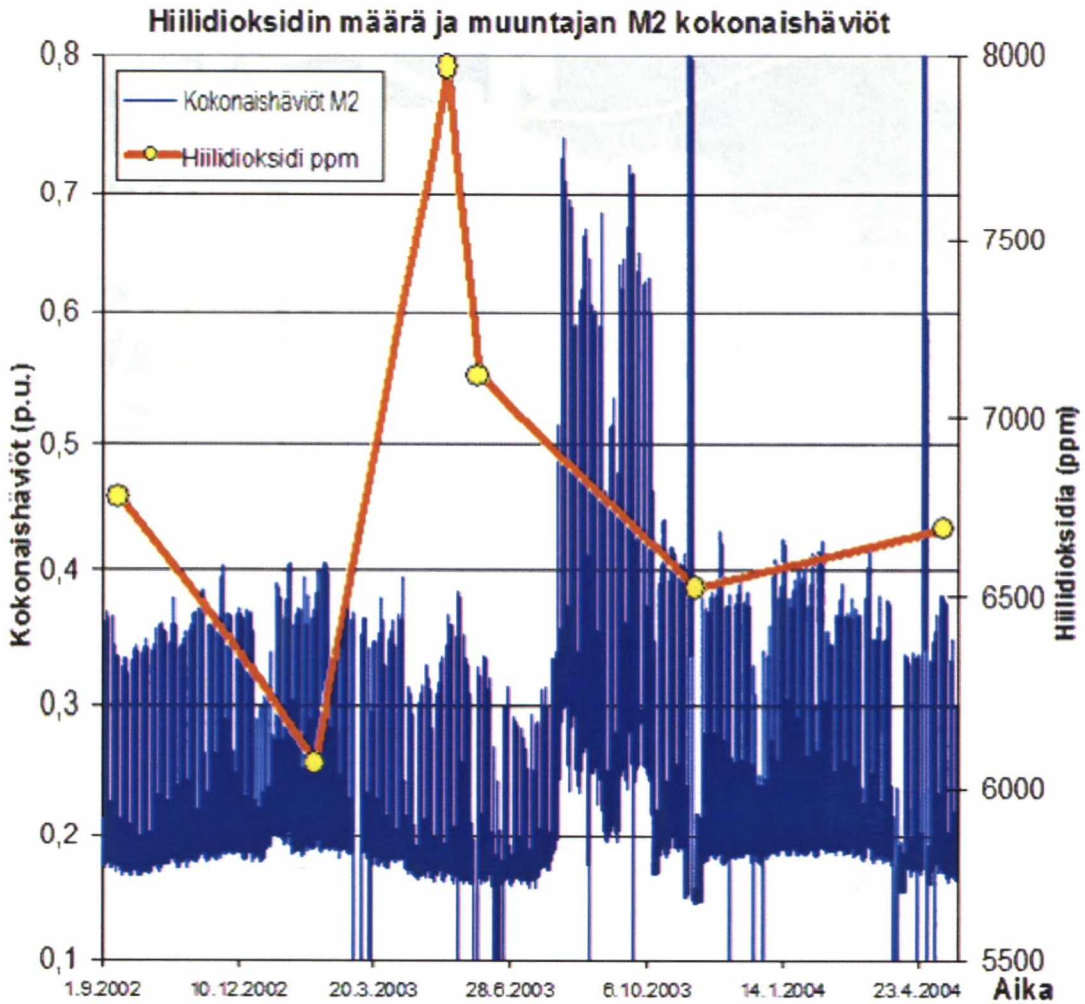
Kuva 9 Hiilidioksidin kehitys ja huippuöljyn lämpötila Pasilan päämuuntajalla M1.

Tehtaalla tehdyt lämpenemiskokeet nimellisteholla osoittavat Pasilan muuntajan huippuöljyn lämpötilaksi  $67,2^{\circ}\text{C}$  ympäristön lämpötilan ollessa  $26,1^{\circ}\text{C}$ . Lämpenemiskoe tehtiin ensimmäiselle päämuuntajalle tuulettimen ja öljypumpun ollessa toiminnassa. Vuosien 2000–2003 tilastotiedoilla laskettuna muuntajan keskiarvoinen kuormitus aikavälillä on 37 % ja saman aikavälin keskiarvoinen lämpenemä on 58 % nimellislämpenemästä.



Kuva 10 Hiilimonoksidin kehitys Pasilan päämuuntajalla M1 ajan funktiona.

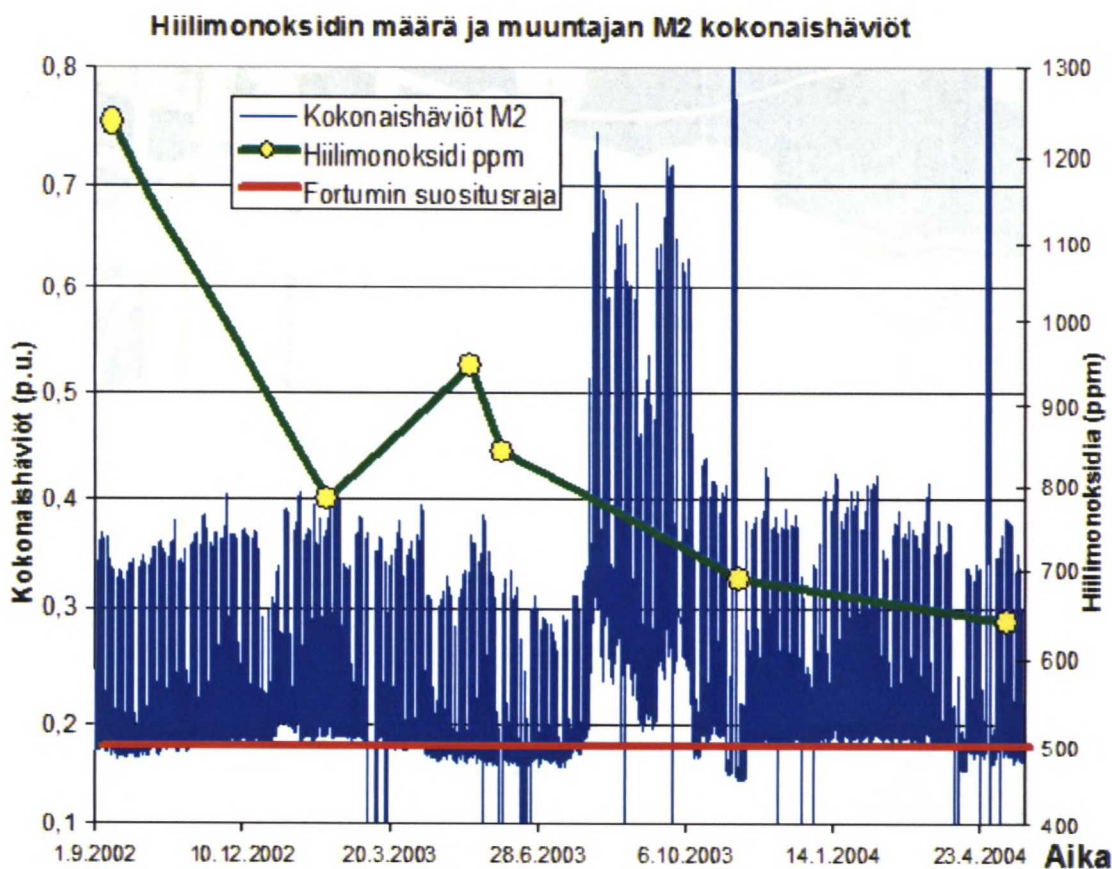
Pasilan päämuuntajalla on kehittynyt hiilimonoksidia yli Fortumin suositusrajan (taulukko 3), joka on 500 ppm /14/. IEC:n muuntajaöljyyn liuenneiden kaasujen tutkimuksessa 90 % vaihteluväli hiilimonoksidille oli 400-850 ppm sellaisille muuntajaöljyille, joilla on yhteys käämikytkimen öljyyn esimerkiksi paisuntasäiliön kautta (taulukko 4). Tämän perusteella hiilimonoksidin määrä ei vielä ole hälyttävä. Tarkkailun intensiivisyys johtuu siitä, että muuntaja on vain muutaman vuoden vanha. Kesällä 2004 tutkitaan jäähdytysjärjestelmän asetusten vaikutusta kaasun kehitykseen muuttamalla tuulettimen käynnistyslämpötilaa.



Kuva 11 Hiilidioksidin kehitys Pasilan päämuuntajalla M2 ajan funktiona.

Pasilan päämuuntajalla M2 hiilidioksidin konsentraatio on vaihdellut reilusti yhden vuoden aikana. Korkeimman konsentraation jälkeen, joka lähenteli arvoa 8000 ppm, vaihdettiin radiaattori tuulettimiseen jäähdytyskapasiteetiltaan tehokkaampaan yksikköön [24]. Tätä ennen muuntajalla oli samanlainen lämmönvaihdin kuin nykyään päämuuntajalla M1. Muuntajan M1 jäähdytysjärjestelmä on teholtaan riittävä, kunhan tuulettimen käytön asetteluarvot ovat kohdallaan. Likaantuminen heikentää radiaattorin jäähdytystehoa huomattavasti. Esimerkkejä tuloksista löytyy kappaleesta kuusi, jossa käsitellään jäähdytysjärjestelmän kunnossapitoa ja seuranta.



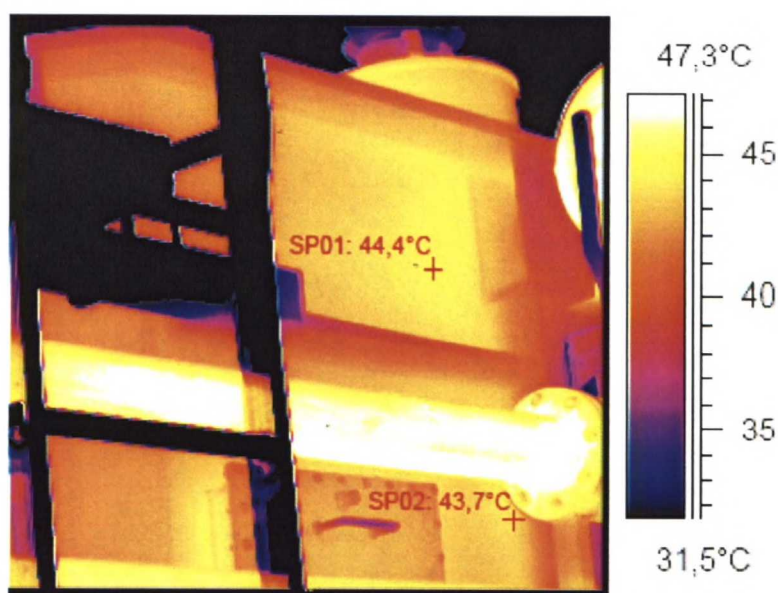


Kuva 12 Hiilimonoksidin kehitys Pasilan päämuuntajalla M2 ajan funktiona.

Hiilimonoksidin konsentraation lähtöarvo  $1238 \frac{\mu\text{l}}{\text{l}}$  on korkealla tasolla: vastaava IEC:n konsentraation 90 % vaihteluväli on  $400\text{--}850 \frac{\mu\text{l}}{\text{l}}$  (taulukko 3). Hiilimonoksidin kehitysnopeus lähti kuitenkin reilusti laskemaan ja tehokkaamman radiaattorin vaihdos näkyy myös 4. kesäkuuta 2003 otetun öljynäytteen analyysissä. Likimain samanlaiset kehityssuunnat ovat nähtävissä Pasilan päämuuntajan M2 hiilimonoksidin kehityksessä verrattaessa hiilidioksidin kehitykseen. Kaasuarvojen ollessa suositusrajoja korkeampia päätettiin päämuuntajat kuvata lämpökameralla, jotta voitaisiin nähdä mahdolliset paikalliset lämpenemät muuntajan tankissa. Poikkeuksellisen suuria säiliövirtoja ei ollut Pasilan päämuuntajilla, jotka voisivat kehittää paikallisesti enemmän hiilimonoksidia ja -dioksidia. /15/

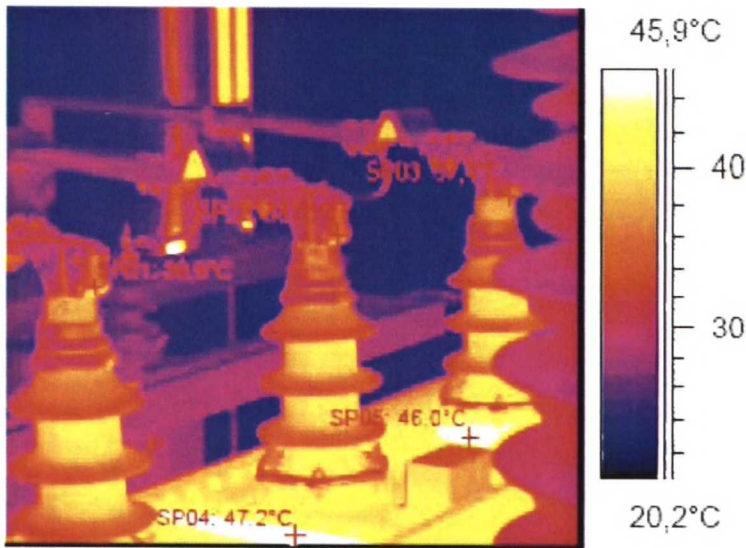
### 2.3 Muuntajan lämpökuvaus

Pasilan päämuuntajat ja radiaattorit kuvattiin lämpökameralla 28.10.2003 yhdeksän Helsingin Energian muun päämuuntajan kanssa. Tarkoituksena oli tutkia muuntajatan-kin lämpenemiä ja mahdollisesti paikantaa pistemäiset tai laajemmat kuumat alueet, joissa voisi hiilioksideja kehittyä. Pasilan muuntajien kuormituksen ollessa noin puolet nimellistehostaan havaittiin suurimmillaan noin 2 K lämpötilaeroja. Karkea arvio nimellisteholla esiintyvistä lämpötilaeroista on tulosten perusteella noin 8K. Jäähdytysjärjestelmän kierrossa ei havaittu vajaatoimintaa kuvausten perusteella.



*Kuva 13 Pasilan päämuuntajan M2 kyljestä: kuvassa näkyvä putki on muuntajasta tulevan noin 50 asteisen öljyn tuloputki radiaattorille.*

Tavoitteena oli myös tutkia kuumia liitoksia ja muuntajan läpivientejä.



Kuva 14 Muuntajan M2 kannen alajännittekiskoista ja läpivienneistä.

Normaalin muuntajan kannen kuumin kohta löytyy aina keskimmäisen alajännitekäämin kohdalta, muuntajan M2 tapauksessa  $47,2^{\circ}\text{C}$  lämpötilassa. Alajännitekäämien virrat ovat suurimpia ja erikoisesti keskimmäisen alajännitekäämin yläpäässä ovat magneettikentät tiheimmillään. Keskimmäisen käämin yläpuoli on siis hyvä referenssipiste jäähdytyksen kannalta.

## 2.4 Hydran kaasuanalysaattori



Hydran 201i-kaasuanalysaattorit seuraavat jatkuvatoimisena vedyn, hiilimonoksidin, asetyleenin ja eteenin määrää, lähettäen kaasujen summa-arvon sähkövalvomoon. Kaasuarvo tallennetaan päämuuntajien tutkimusta varten minuutin välein SQL-tietokantaan. Mittaustuloksia voi käyttää hyvin kaasun kehityssuunnan seurantaan öljyanalyysien välissä. Tarkempaa tietoa laitteen käytöstä löytyy Jyrki Niemisen Helsingin Energialle tekemästä lopputyöstä: ”Kunnonhallintamenetelmien soveltaminen sähköverkon kunnonpitoon”. Hydranin laitekuva on otettu Pasilan sähköasemalla kesällä 2004.

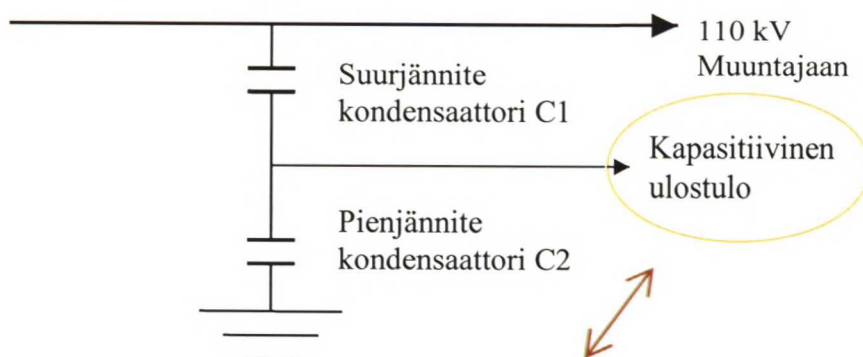


## 2.5 Osittaispurkauksien mittaus

Muuntajan sisällä käämeissä ja johtimissa voi tapahtua purkauksia, kun jännitelujuus rakenteessa pettää paikallisesti. Näitä voidaan havaita akustisilla mittauksilla ja tarkemmin analysoida sähköteknisellä mittauksella. Tavoitteena on selvittää mitä tietoa näillä eri menetelmillä voidaan saada muuntajan tilasta ja millä investoinneilla mittaus on mahdollinen Helsingin Energian päämuuntajille. Näitä mittauksia ei kuitenkaan päätetty tehdä, sillä kaasuanalyysit eivät anna riittävää aihetta siihen. Seuraava selvitys on tehty tulevaisuutta ja sen tuomia mahdollisia tarpeita silmällä pitäen.

### 2.5.1 Sähkötekkinen mittaus

Muuntajan yläjännitepuolen läpiviennissä on kapasitiivinen ulostulo, johon voidaan kytkeä mittalaitteisto seuraamaan purkauksia.

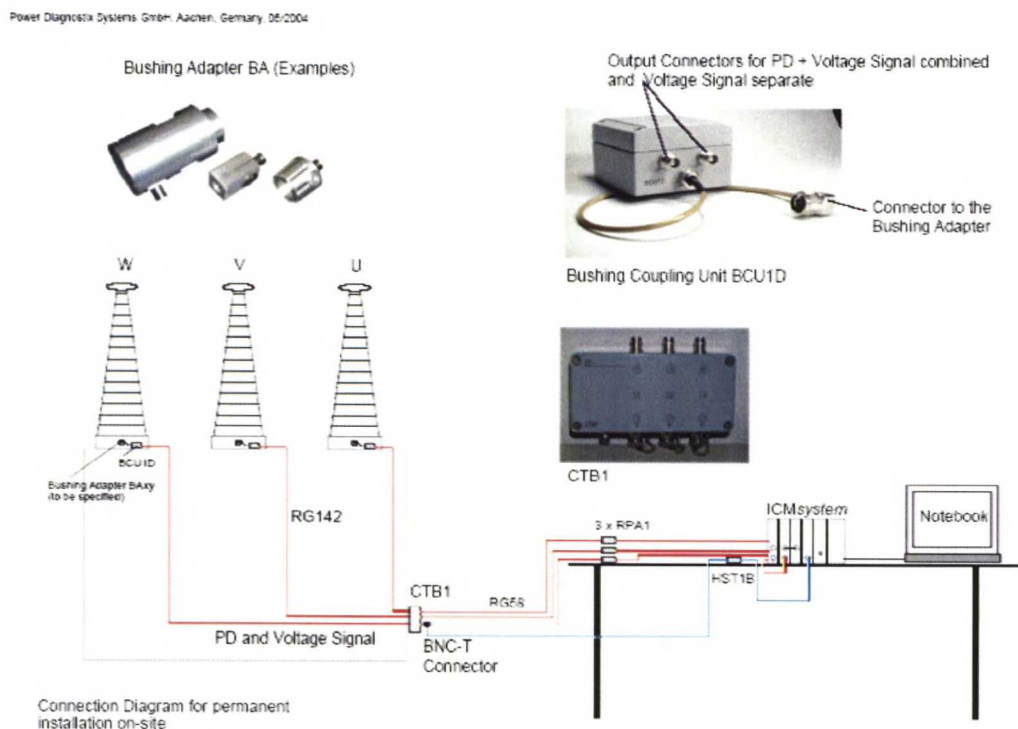


*Kuva 15 Pasilan päämuuntajan M2 kapasitiivinen ulostulo läpivientieristimessä, joka on kuvattu kuormitusmittausten yhteydessä 14.6.2004.*

Kaikista päämuuntajien läpivienneistä 140 yhteensä 169:stä on ABB:n valmistamaa mallia GOB-550. Tämä on tärkeä asia huomioda, sillä mittauslaitteisto mitoitetaan ulostulon kapasitanssien arvoille C1 ja C2. Muuntajan hankintaohjelmassa on kyseinen läpivienti ehtona myös uusia päämuuntajia hankittaessa, kuten kuvassa 16 näkyvässä uudessa Kannelmäen päämuuntajassa M3. (Kuva on otettu ABB:n suurmuuntaja tehtaalla vastaanottokokeissa). /23/

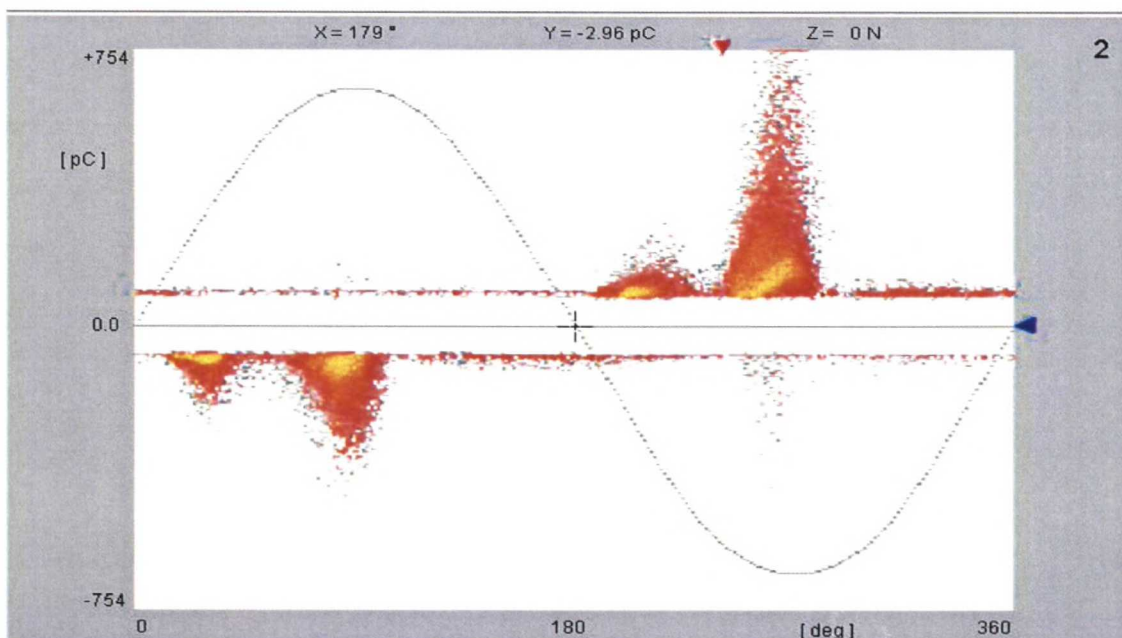


*Kuva 16 ABB:n tehtaalla Kannelmäen muuntajan osittaispurkauskoe 9.9.2004.*



*Kuva 17 Osittaispurkausten mittaukseen tarvittava laitteisto.*

Laitteistoinvestoinnit maksavat noin kymmenentuhatta euroa: adapteri läpiviennin ulostuloon ja esivahvistin jokaiselle vaiheelle sekä yksi jännitteen muunnin. Loput tarvittavasta laitteistosta, mitkä ovat kuvassa 17 pöydällä, löytyvät Teknillisen Korkeakoulun Suurjännitetekniikan laboratoriosta. /33/



Kuva 18 Osittaispurkauksmittausten tulos eräällä muuntajalla. /33/

Osittaispurkauksen paikasta jännitteen vaiheen suhteen saadaan tietoa mahdollisen vian luonteesta. Kaasukupla käämissä näkyy purkauksina vaihejännitteen itseisarvon kasvaessa, eli jännitteen vaihekulmilla 0-90 ja 180-270 astetta. Jos purkaukset ovat suuria edellisillä vaihekulmilla, on syytä epäillä suojaelektrodin sydämen maadoitusta. Purkauspiikin löytyessä jännitteen huipuilta, on kyseessä koronapurkaus. Jos piikki on negatiivisella huipulla, niin jännitteisessä osassa on terävä kärki, jossa tapahtuu purkauksia. Piikki positiivisella jännitehuipulla kertoo puolestaan maadoitetun osan terävästä kärjestä, johon tapahtuu purkauksia. Purkaukset jännitteen nollakohdilla johtuvat kontaktihäiriöstä. Kipinäointia syntyy nopeasta jännitteen polariteetti muutoksesta johtuen ja kyseessä on löysä liitos muuntajan sisällä. Purkausten ylikuuluminen muilta vaiheilta näkyy piikkeinä vaihejännitteen laskevilla osuuksilla. /33/

## 2.5.2 Akustinen mittaus

Akustisella menetelmällä voidaan havainnoida ja paikantaa purkauksia. Mittaus on kuitenkin epätarkka, eikä kerro kuin osittaispurkausten suuruusluokista. Tietynlaiset



viat voidaan tarkoilla akustisilla mittauksilla paikantaa muuntajan sisällä jalkapallon kokoiselle alueelle. Mutta esimerkiksi purkauksia kaasukuplan sisällä ei tällä menetelmällä niin tarkoin havaita. Akustisen mittauksen suurpiirteisyydestä johtuen käytetään sähkötekniistä mittausta aina sen ollessa mahdollista. /33/

### 3 Tehomuuntajien jäähdyttäminen

Muuntajaa suunniteltaessa on huomioitava sähkötekni-  
sten, termisten ja hydraulisten ominaisuuksien vaikuttavan toisiinsa. Esimerkiksi ratkaisu termiseen ongelmaan voi aiheuttaa vaikeuksia sähkötekni-  
seen suunnitteluun, joten näitä kaikkia osa-alueita on hallittava muuntajia rakennettaessa.

Helsingin Energian päämuuntajat ovat öljyeristeisiä ja -jäähdytteisiä. Edellisessä luvus-  
sa tarkasteltiin muuntajaöljyyn liuenneita kaasuja, seuraavaksi perehdytään öljyjäähdy-  
tykseen. Päämuuntajassa kehittynyt lämpöenergia siirtyy muuntajaöljyssä  
lämmönvaihtimelle, jotka nykyään ovat öljy-ilma lämmönvaihtimia. Pohdittavana on  
myös harvemmin käytetty vaihtoehto: öljy-vesi lämmönvaihdin, jonka käyttöä on väl-  
tetty öljyn ja veden sekoittumisriskistä ja yleensä myös kalliista jäähdytysvedestä johtu-  
en.

#### 3.1 Ikääntyminen ja lämpötila

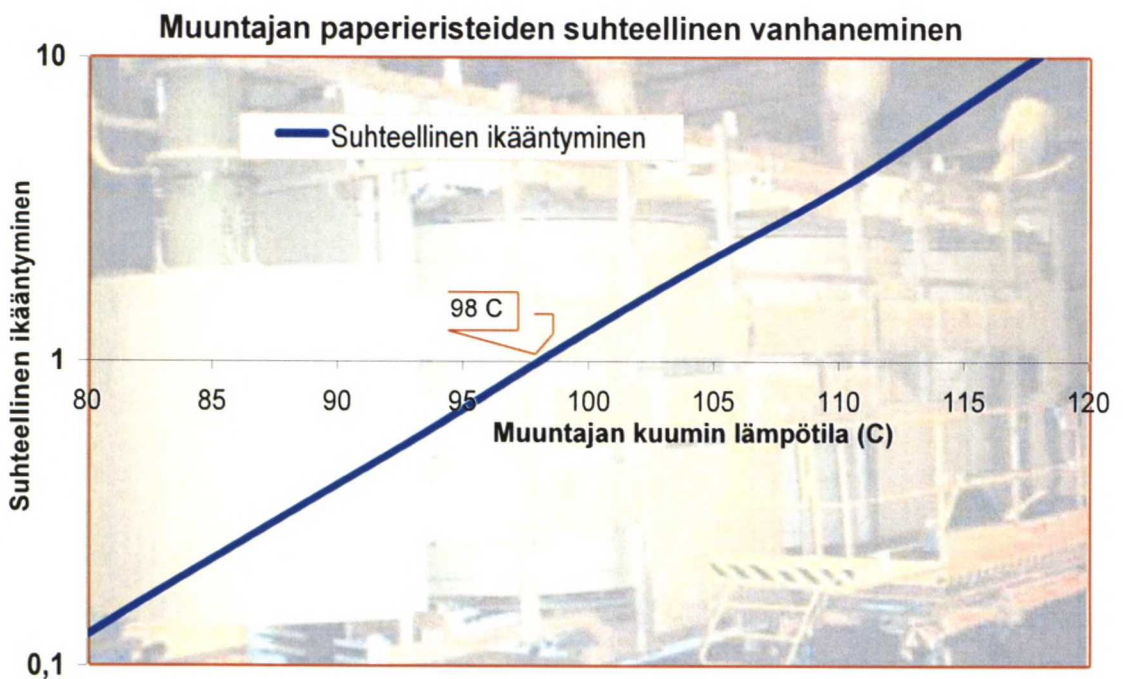
Muuntajan ikääntymiseen vaikuttavat neljä tärkeintä tekijää ovat muuntajan vesi-,  
happi- ja happopitoisuus sekä lämpötila. Tarkastelun kohteena ovat selluloosa-pohjaiset  
materiaalit, jotka ovat kaikkein alttiimpia muutoksille. Paperieristeiden sähköiset, me-  
kaaniset ja kemialliset ominaisuudet muuttuvat ajan funktiona nopeimmin kaikista  
muuntajan materiaaleista /17/. Kaikkien ikääntymiseen vaikuttavien tekijöiden tarkka  
tieteellinen mallintaminen on monimutkaista: ratkaisuna olisi monista funktioista yhdis-  
tetty funktio. Edellä mainittu alue luultavimmin kehittyy lähitulevaisuudessa IEC:n  
toimesta suomalaisen asiantuntijan Hasse Nordmanin johtamana. Tässä vaiheessa on  
suuntaa-antavaa tarkastella ikääntymistä yhden tekijän suhteen kerrallaan. Arrheniuksen  
lakia on kehitetty yksinkertaiseksi lämpötilasta  $\theta(^{\circ}C)$  ja materiaalivakiosta  $p(^{\circ}C^{-1})$   
riippuvaksi yhtälöksi. Tämä tunnetaan Montsingerin yhtälönä ja on sovellettavissa  
80–140 $^{\circ}C$  lämpötila-alueella /17. /16/

$$Elinikä = e^{-p\theta} \quad (6)$$

Teorian mukaan 6 K lämmön nousu puolittaa muuntajan paperieristeen oletetun eliniän.  
Oletuksen perusteella yhtälöstä 6 saadaan materiaalivakio paperieristeelle:

$p = 0,1155^{\circ}C^{-1}$ . Eliniän referenssilämpötila on muuntajan kuumin piste, joka saadaan  $20^{\circ}C$  ympäristön lämpötilassa  $65\ K$  keskiarvoisella öljyn lämpötilan nousulla,  $22\ K$  käämin öljyn lämpötilaerolla ja  $2\ K$  differentiaalilla kuumimpaan pisteeseen. Näin saatu  $20 + 65 + 11 + 2 = 98^{\circ}C$  lämpötila on vertailuarvona muuntajaan paperieristeiden ikääntymiseen. /17/

$$\text{Suhteellinen ikääntyminen} = \frac{e^{-p(98^{\circ}C)}}{e^{-p\theta}} \quad (7)$$

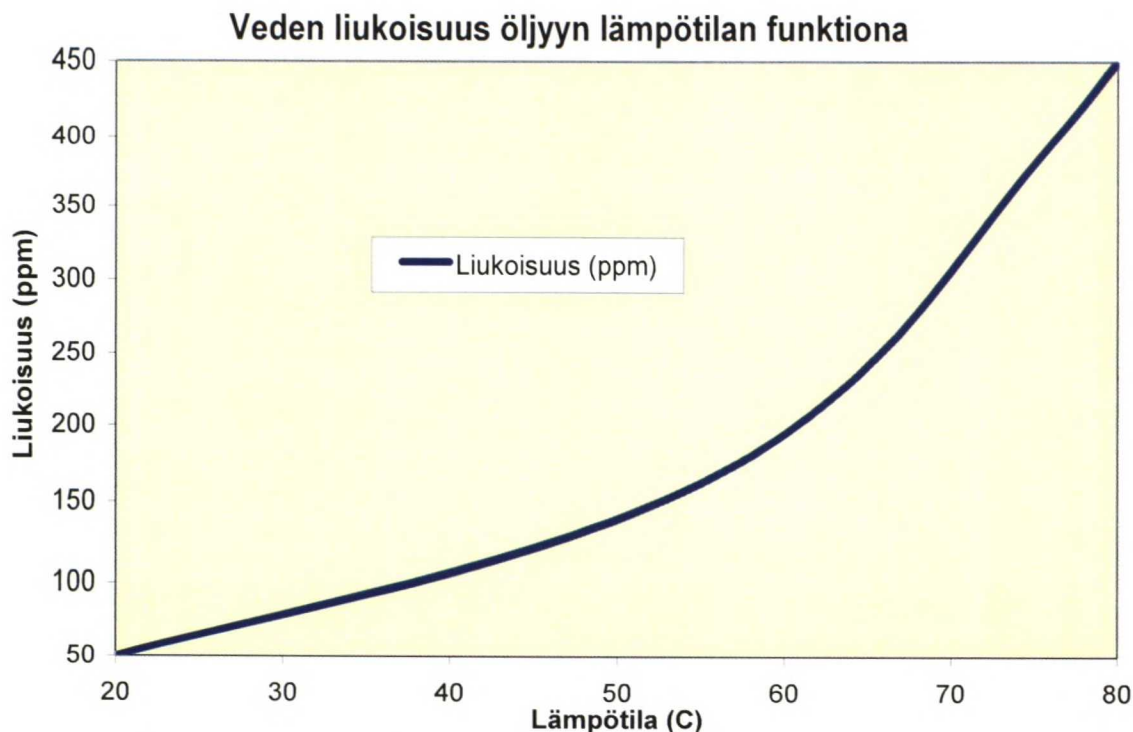


Kuva 19 Muuntajien suhteellinen vanheneminen lämpötilan funktiona logaritmisella asteikolla.

On paljon asioita kuumimman lämpötilan lisäksi, jotka vaikuttavat muuntajan vanhenemiseen, joita edellinen malli ei ota huomioon. Näitä ovat oikosulkuvoimat muuntajan sisällä, liitosten löystyminen, muuntajan käyttötapa ja muut kemialliset reaktiot. Vesi muuntajan paperieristeissä nopeuttaa olennaisesti vanhenemista. Tämän tutkimuksen perusteella näyttää siltä, että kannattaa alentaa muuntajien maksimi käyntilämpötilaa, siten, ettei lämpökuorma varastoituisi merkittävästi muuntajaan.

Seuraavaksi tarkastelemme Helsingin Energian muuntajissa käytetyn öljynjalostajan tutkimustuloksia; aiheena on lämpötilan vaikutus veden liukoisuuteen öljyssä. /17/





Kuva 20 Veden liukoisuus öljyyn lämpötilan funktiona. /16/

Lämpötilan noustessa öljyyn liukenee enemmän vettä. Osa vedestä tulee ulkoilman kautta, vaikka ilma kulkee muuntajan ilmakehän läpi. Toinen tärkeä tekijä veden määrän suhteen on selluloosan hajoaminen, jossa sivutuotteena syntyy vettä paperieristeissä. Liukoisuustasapainon saavuttaminen vie aikaa 2-8 tuntia. /16/ Suurin osa, likimain 99 % vedestä on kuitenkin paperieristeessä ja lämpötilan muutokset vaikuttavat veden määrään öljyssä, muttei juurikaan paperieristeessä /18/.

Edellisten tulosten perusteella keskiarvoisen käyntilämpötilan alentaminen ei huomattavasti vaikuta muuntajan kosteuspitoisuuteen kuin välillisesti. Maksimi käyntilämpötilan alentaminen hidastaa paperin hajoamista, jossa reaktiotuotteena muodostuu vettä. Täten koko tapahtumaketju vielä itse kiihdyttäisi selluloosan hajoamista. Hyödyllistä on siis käyttää OFAF - muuntajaa keskiarvoisesti  $35-50^{\circ}\text{C}$  lämpötilan tienoilla, siten ettei lämpötila vaihtelisi 5 astetta enempää edestakaisin. Tämä on mahdollista toteuttaa jäähdytysjärjestelmän säätötekniikalla, käyttäen toisiovirran funktiona laskettujen muuntajahäviöiden kehittymistä reaaliaikaisesti. Lämpölaajenemisen pienentäminen hidastaa myös kosteuden kertymistä.

### 3.2 Jäähdytysjärjestelmien lämpökäyttäytyminen

Jatkuva suositeltava kuormitus pohjautuu muuntajan nimellistehoon, jäähdytysjärjestelmän lämpötiloihin ja eristeiden ikääntymiseen. Erilaisia ratkaisuja käämin jäähdytyskanaville ovat suorat aksiaaliset kanavat ja käämin sisällä mutkittelevat kiertotiet. Näistä luotettavampi ratkaisu on aksiaaliset jäähdytyskanavat, mutta nämä vaativat samalla myös isomman tilan käämin rakenteessa. Käämin sisällä mutkittelevat jäähdytyskanavat ovat hyviä jäähdytysominaisuuksiltaan rakennelman toimiessa; pieni virhe valmistuksessa voi luoda paikallisen kuuman pisteen lyhentäen muuntajan käyttöikää huomattavasti, joten tämä menetelmä vaatii korkeampaa laadun tarkkailua. /25/

Lämpökäyttäytymistä voidaan analysoida termodynamiikan menetelmin tuntien järjestelmän jäähdytysaineiden virtaukset, lämpötilan muutokset ja aineiden fysikaaliset ominaisuudet. /25/

$$\boxed{P = \delta \rho c \Delta T} \quad (7)$$

$P =$  Jäähdytysteho

$\rho =$  Tiheys

missä  $\delta =$  Virtausnopeus

$c =$  Ominaislämpökapasiteetti

$\Delta T =$  lämpötilaero

Lasketaan esimerkkitilanne Pasilan päämuuntajasta M1: Kuinka paljon lämpöenergiaa siirtyy öljystä ilmaan lämmönvaihtimella 2.7.2004 kello 19:55, jolloin radiaattorin lämpötilagradientti on  $\Delta T = 1,09K$  ja öljyn virtausnopeus 1472 litraa minuutissa?

$$\rho = 850 \frac{kg}{m^3}$$

$$\delta = \frac{1,472 \frac{m^3}{min}}{60 s} = 0,02453 \frac{m^3}{s}$$

Arvot muuntajaöljylle Nynäs nytro10X:

$$c = 2000 \frac{Ws}{kg \cdot K}$$

$$P_r = 850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0,02453 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 2000 \frac{\text{Ws}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 1,09 \text{K} = 45460 \text{ W}$$

Muuntajaöljystä siirtyy radiaattorissa ilmaan 45,5 kW lämpöenergiaa tuulettimien ollessa päällä ja läpikulkevan ilman lämmetessä  $8,4^\circ \text{C}$ . Huippuöljyn lämpötila on  $34,6^\circ \text{C}$  ja ulkoilman lämpötila on  $16,7^\circ \text{C}$ .

Lasketaan myös kuinka paljon lämpöä siirtyy suoraan muuntajatankista ilmaan. Kun lämpötilagradientti muuntajan ja huoneen lämpötilan suhteen on 50 K, niin lämmönsiirtoteho tankista ilmaan on  $0,03 \frac{\text{W}}{\text{cm}^2}$  /3/. Siirtyvä teho on lineaarisesti riippuvainen lämpötilagradientista ja pinta-alasta /16/. Tässä tapauksessa keskiarvoinen muuntajatankin pinnan ja huoneen lämpötilaero on 6 K.

$$\text{Tankin pinta-ala on } 2 \cdot 4\text{m} \cdot 3,5\text{m} + 2 \cdot 2\text{m} \cdot 3,5\text{m} + 2 \cdot 4\text{m} \cdot 2\text{m} = 58\text{m}^2$$

$$\text{Putkien yhteispinta-ala on } 2\pi \cdot 0,057\text{m} \cdot 6 \cdot 2\text{putkea} = 4,3\text{m}^2$$

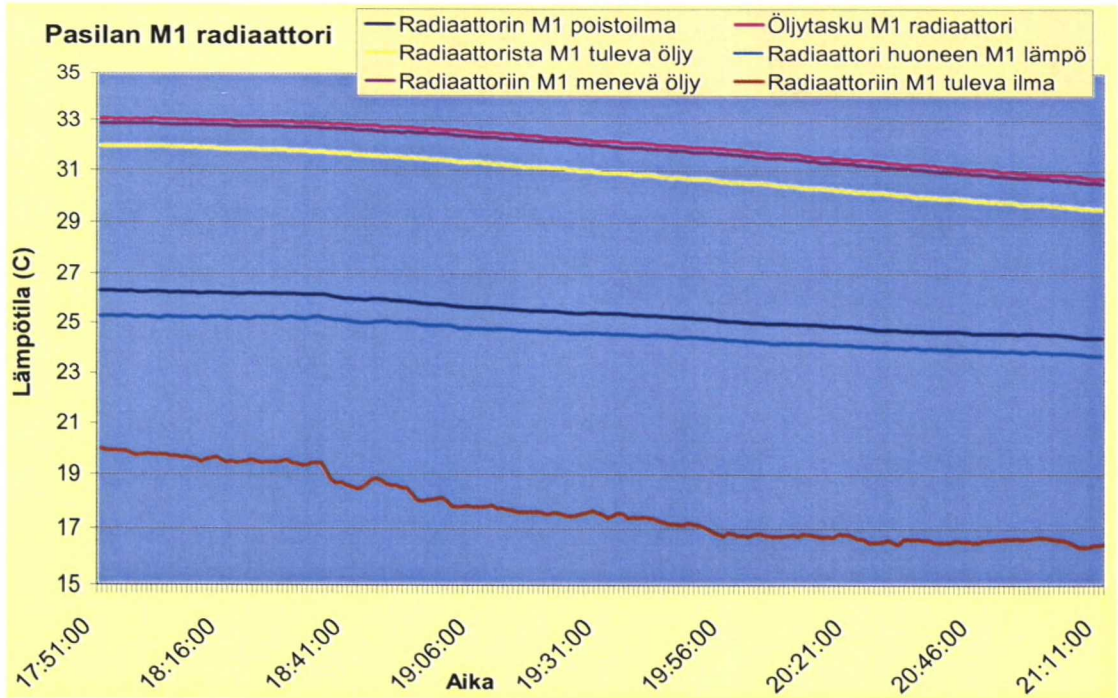
Siirtyvä teho  $P_{8,5\text{K}}$  pinta-alaa kohti 8,5 K gradientilla:

$$P_{8,5\text{K}} = \frac{6\text{K} \cdot 0,03 \frac{\text{W}}{\text{cm}^2}}{50\text{K}} = 0,0036 \frac{\text{W}}{\text{cm}^2}$$

Tankista ja putkista yhteensä ilmaan siirtyvä lämpöteho:

$$P_{\text{lämpö}} = 0,0036 \frac{\text{W}}{\text{cm}^2} \cdot (580000\text{cm}^2 + 43000\text{cm}^2) = 2242,8\text{W}$$





Kuva 21 Päämuuntajan M1 öljyn jäähtyminen radiaattorilla 2.7.2004.

Muuntajan kuormitus oli 33,4 % nimellisvirrastaan. Virran funktiona kaavalla 5 laskettu häviölämpöteho on 37,85 kW. Jäähdytysjärjestelmä ja muuntajan rakenteet poistavat lämpöenergiaa yhteensä 47,7 kW teholla: jäähdyttävä teho on 10 kW suurempi kuin häviöteho, joten muuntajaöljy jäähtyy. Tämä voidaan todeta myös kuvasta 21, jossa öljy keskiarvoisesti jäähtyy kaksi celsiusastetta noin kahden tunnin kuluessa.

### 3.2.1 Esimerkkejä käyntilämpötiloista

Tiettyjen päämuuntajien käyntilämpötiloja mitataan ja tallennetaan käytönvalvontajärjestelmään. Seuraavissa taulukoissa on mittaustuloksista haettu keskiarvot ja maksimit lämpötiloille ja kuormitusasteille. Käyttöaste on laskettu toisiovirran nollasta poikkeavien tunti-arvojen suhteesta kyseisen aikavälin tuntien määrään.

Taulukko 9 Tuntimittaustilasto ajalta 26.9-31.12.2000.

Muuntaja	Käämin lämpötila		Öljyn lämpötila		Kuormitusaste (%)		Käyttöaika
	max (°C)	KA (°C)	max (°C)	KA (°C)	max	KA	(%)
Kamppi M1 OFAF	75,4	60	48,6	43	79,6	50	96
Kamppi M2 OFAF	90,6	67	48,6	43	84,7	53	96
Myllypuro M1 ONAF	59,7	41	51,0	37	61,0	40	86
Myllypuro M2 ONAF	84,6	40	60,9	36	90,2	29	96
Pasila M1 OFAF	69,8	49	51,6	42	93,9	40	93
Pasila M2 OFAF	80,1	54	62,3	49	88,6	40	96
Suurmetsä M1 ONAF	73,9	48	55,8	41	83,1	42	92
Suurmetsä M2 ONAF	67,4	10	56,7	10	62,8	42	4
Viikinmäki M3 ONAF	58,2	37	46,5	31	66,3	37	50

Virtatiedot ovat mitattu muuntajien keskiännittelähdöistä. Käämin- ja öljynlämpötilojen keskiarvot ovat laskettu mittausalueen kaikista nollasta eriävistä arvoista.

Taulukko 10 Tuntimittaustilasto ajalta 1.1-30.4.2004.

Muuntaja		Käämin lämpötila (°C)		Öljyn lämpötila (°C)		Kuormitusaste		Käyttöaika
		max	KA	max	KA	max	KA	(%)
Kamppi M1	(OFAF)	74	44	49	37	94 %	51 %	81 %
Kamppi M2	(OFAF)	85	33	50	31	94 %	32 %	67 %
Myllypuro M1	(ONAF)	53	40	48	35	64 %	40 %	100 %
Myllypuro M2	(ONAF)	56	43	48	35	65 %	42 %	100 %
Pasila M1	(OFAF)	78	46	57	40	92 %	37 %	97 %
<b>Pasila M2</b>	<b>(OFAF)</b>	78	52	59	45	93 %	43 %	97 %
Viikinmäki M3	(ONAF)	59	32	49	26	61 %	45 %	27 %
Pitäjänmäki M1	(ONAF)	104	47	81	42	108 %	43 %	100 %
Pitäjänmäki M2	(ONAF)	50	36	45	31	55 %	28 %	91 %
Pitäjänmäki M3	(ONAF)	18	5	18	3	12 %	3 %	4 %
Suurmetsä M1	(OFAF)	84	25	62	20	96 %	66 %	24 %
Suurmetsä M2	(OFAF)	83	56	63	46	94 %	55 %	76 %
Kasarmi M1	(OFAF)	50	33	34	25	92 %	49 %	100 %

Arvot ovat keskiarvoja kaikista tuntimittausarvoista. Esimerkiksi Suurmetsän muuntajan M1 käyttöaste mittausjaksolla on 23,5 % ja siitä johtuen muuntajan keskiarvoinen huippuöljyn lämpötila on alhainen, kuin myös Pitäjänmäen muuntajalla M3.



### 3.2.2 Oil Natural Air Natural – ONAN

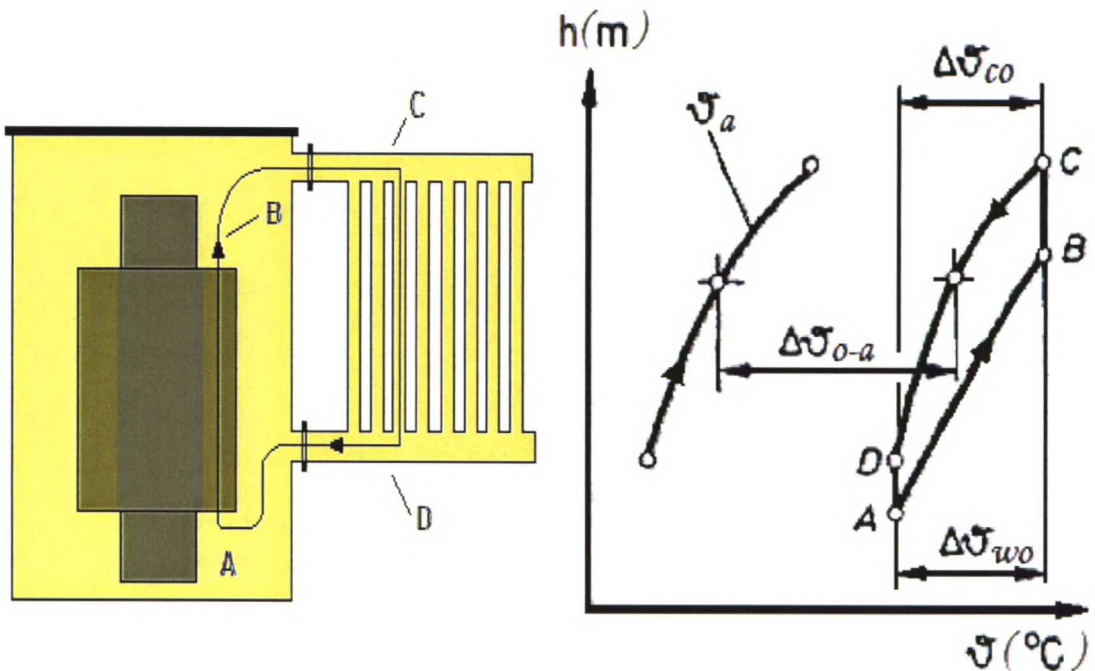
Luonnollinen öljykierto perustuu muuntajan lämpöenergian aiheuttamaan painovoimaiseen nosteeseen. Muuntajan aktiiviosissa muodostunut lämpö siirtyy öljyyn, jolloin maan vetovoiman vaikutus suhteessa ympäröivään kylmempään öljyyn pienenee ja kuumempi virtaa ylöspäin alapuolelta kylmemmän virratessa tilalle. Jäähdyttimessä kuuma öljy luovuttaa lämpöenergiaa sitä kylmemmille radiaattorin seinämille, öljyn tihentyessä maan vetovoiman suhteellinen vaikutus kasvaa ja öljy virtaa alaspäin. Näistä tekijöistä muodostuu luonnollinen öljykierto, virtausnopeuden riippuessa lämpötila- ja korkeuseroista sekä kulkureitin poikkipinta-alasta. Kuvassa 22 on esitetty korkeuseroltaan yleisratkaisu öljyn lämpötila jäähdytysjärjestelmästä. /17/

$\vartheta_a =$  Ilman lämpötila

$\Delta\vartheta_{o-a} =$  Jäähdyvän öljyn ja lämpenevän ilman keskiarvoinen lämpötilaero

$\Delta\vartheta_{co} =$  Radiaattorin öljyn lämpötila gradientti

$\Delta\vartheta_{wo} =$  Öljyn lämpötila gradientti käämissä

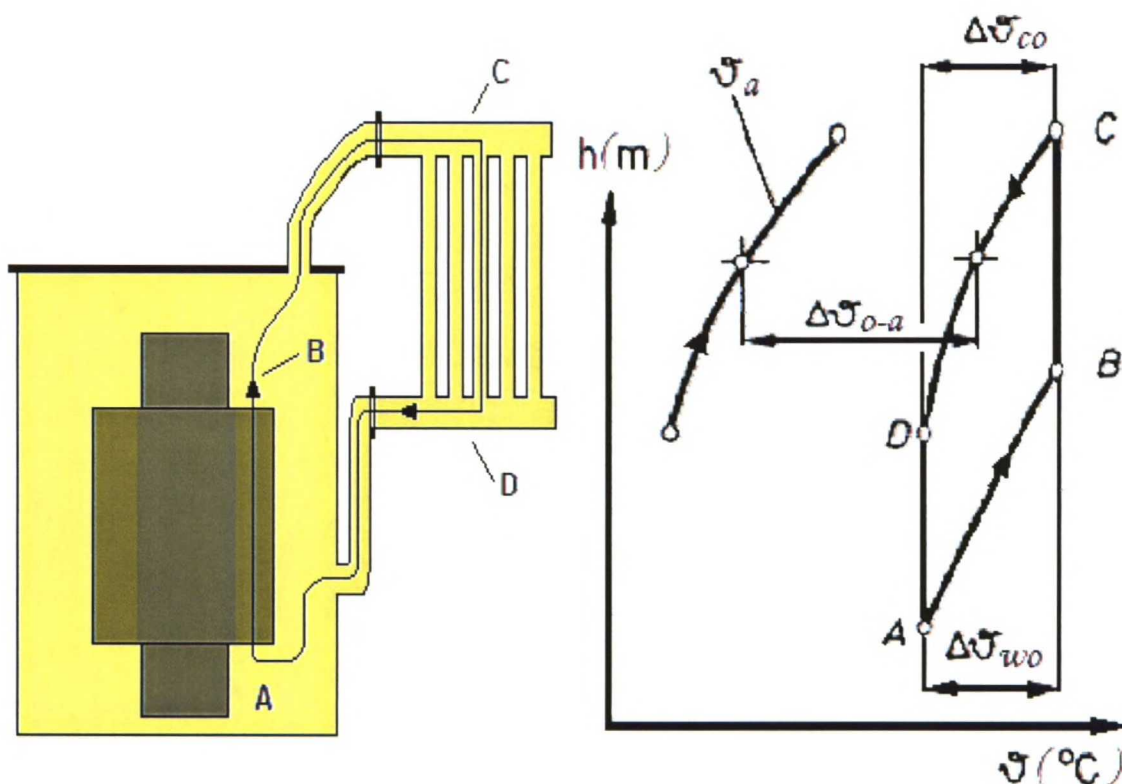


Kuva 22 Luonnollisella öljy- ja ilman kierrolla toteutettu jäähdytysjärjestelmä. /17/

Pisteestä A öljy virtaa käämikanaviin lämmiten matkalla häviöenergiasta pisteeseen B: öljyn virtausnopeus on riippuvainen muuntajan ja käämin jäähdytyskanavien rakentees-



ta, kuormituksesta ja lämpötilaeroista. Ohjearvoina käytetään IEC:n suositusarvoja, jotka ovat tankin pohjalla olevan öljyn maksimilämmön nousulle jäähdytysilman suhteen  $34K$  ja huippuöljyn lämmön nousulle  $43K$ . Radiaattorissa öljy laskeutuu pisteestä C pisteeseen D ja jäähtyy riippuen jäähdyttimen pinta-alasta, öljyn virtausnopeudesta sekä ilman ja öljyn lämpötilaerosta. /17/



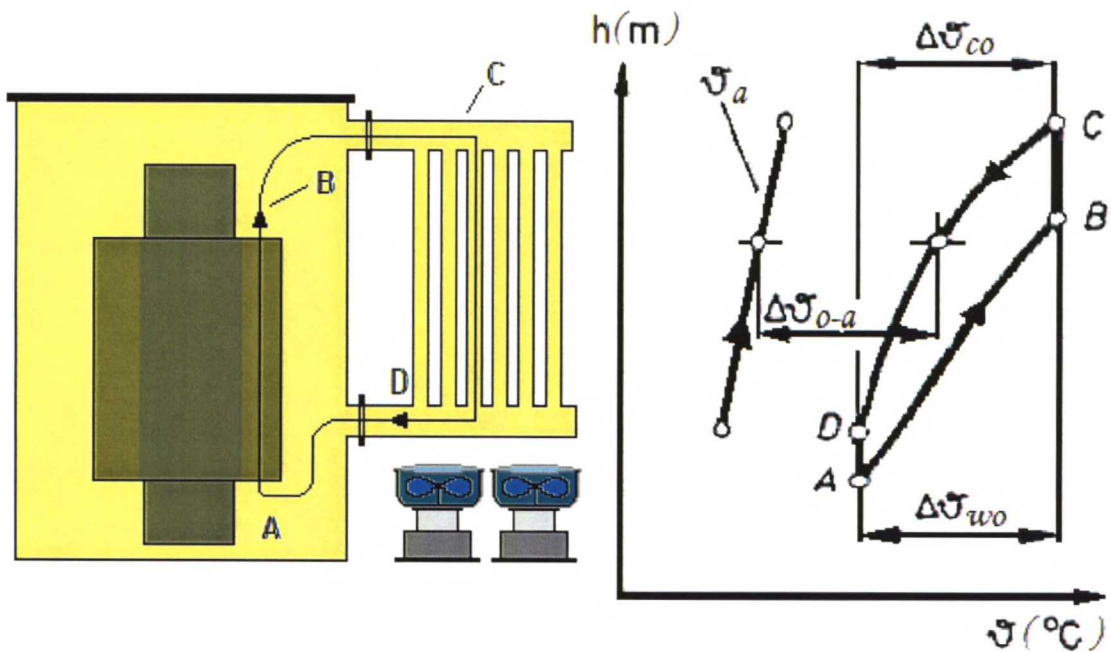
Kuva 23 Luonnollinen öljy- ja ilmakierto sekä korkeuserolla kasvatettu öljyvirtaus. /17/

Kun radiaattorit asennetaan ylemmäksi, öljyn virtausnopeus kasvaa, sillä painovoiman vaikutusalue pitenee (olettaessa häviölämmöntuoton pysyvän samassa arvossa). Käämin ja radiaattorin lämpötilagradientit pienevät, mutta öljyn ja ilman keskiarvoinen lämpötilagradientti pysyy samana. Pinta-ala ABDC on suoraan verrannollinen öljyn virtausta ylläpitävään nosteeseen. /17/

Esimerkiksi Brasiliassa Rio de Janeiron keskustan sähköasemaa suunniteltaessa hyödynnettiin radiaattorin ja muuntajan korkeuseroa riittävän jäähdytysöljyn nosteen luomiseksi. Maapinta-alan ollessa erittäin arvokasta pyrittiin sähköasema rakentamaan mahdollisimman pienelle alalle: muuntaja ja radiaattori asennettiin päällekkäin 10,5 metrin korkeuserolla. Öljyn virtausta piti rajoittaa valitsemalla halkaisijaltaan oletusarvoisen kahdeksan tuuman sijaan viisi tuumainen öljyputki. /10/

### 3.2.3 Oil Natural Air Forced – ONAF

ONAF - ratkaisu on toiseksi yleisin Helsingin Energian sähköasemilla: yhteensä 17 päämuuntajan jäähdytys on toteutettu luonnollisella öljy- ja pakotetulla ilmakierrolla. Järjestelmiä tosin käytetään luonnollisella ilmakierrolla, kunnes termostaatti kytkee tuulettimet päälle lämpötilan ylittäessä paikallisen asetteluarvon. Huippuöljyn termostaatti säätelee tuulettimien toimintaa ja käynnistyksen asetteluarvoja löytyy  $50^{\circ}\text{C} - 80^{\circ}\text{C}$ . Lämpenemiskokeiden perusteella jokaiselle ONAF -jäähdytteiselle päämuuntajalle on määritetty erikseen kuormitettavuus silloin, kun järjestelmän tuulettimia ei käytetä. ONAN -järjestelmän kuormitettavuudet vaihtelevat 60 - 70 % nimellistehostaan.



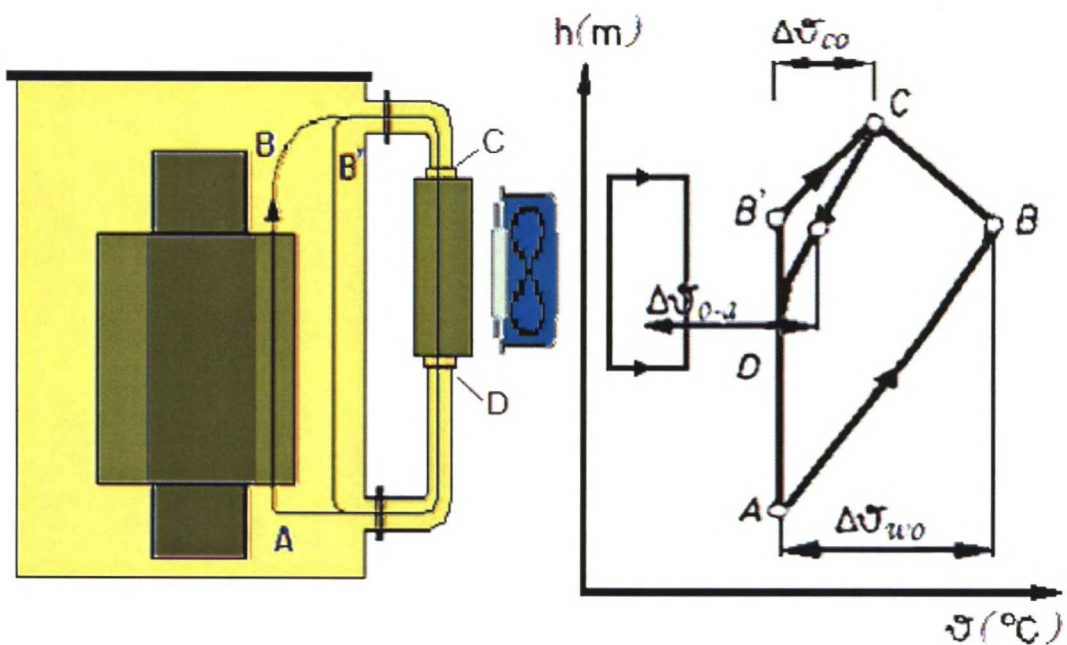
Kuva 24 Luonnollisella öljy- ja pakotetulla ilmakierrolla toteutettu jäähdytysjärjestelmä. /17/

Tuulettimella pakotettu ilmakierto radiaattoreissa parantaa lämmönsiirron nopeutta: pienemmällä ilman lämpötilaerolla saavutetaan sama jäähdytysteho kuin luonnollisella ilmajäähdytyksellä. Öljy virtaa myös nopeammin verrattaessa luonnollisella ilmajäähdytyksellä toteutettuun järjestelmään, olettaen muuntajahäviöiden olevan samansuuruiset. Ilman ja öljyn keskiarvoinen lämpötilaero hieman pienenee tuulettimin pakotetun ilmavirtauksen johdosta ja tällöin öljyn viskositeetti kasvaa. Käämin ja radiaattorin lämpötila gradienttien arvot myös nousevat hieman. /17/

Yleensä järjestelmän tuulettimia suositellaan käynnistettäväksi, kun huippuöljyn lämpötila nousee tarpeeksi korkeaksi, joka vaihtelee valmistajasta riippuen 50:stä jopa 80:n °C. Tarkastelun kohteena ONAF -jäähdytysjärjestelmän osalta on Pitäjänmäen sähköasema, jossa on neljä päämuuntajaa, joista kolmea tarkkaillaan järjestelmän asettelurajojen ja lämpötilojen sekä kaasuanalyysien suhteen.

### 3.2.4 Oil Forced Air Forced – OFAF

OFAF - jäähdytysmenetelmä on yleisin Helsingin Energian sähköasemilla, tällainen jäähdytysjärjestelmä löytyy 26 päämuuntajalta. OFAF -järjestelmän etuja ovat pienempi tilantarve, alhaiset hankintahinnat ja joustava sijoitettavuus.



Kuva 25 Pakotetulla öljy- ja ilmakierrolla toteutettu jäähdytysjärjestelmä. /17/

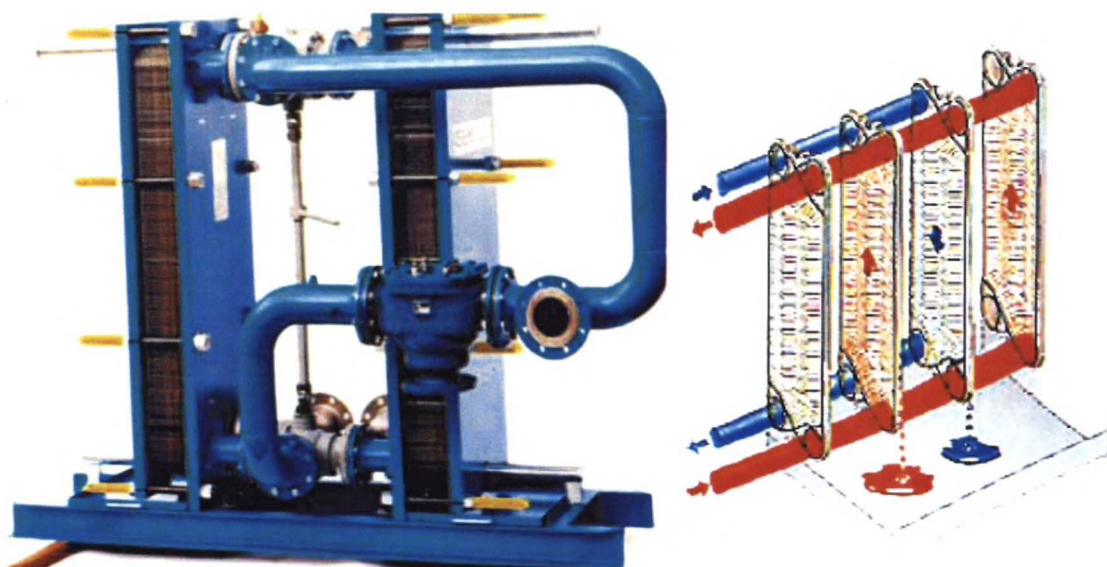
Lämpötilan ja korkeuden suhteen piirrettyssä kuvaajassa 25 on nähtävissä öljyn kierron eri vaiheet. Erikoinen osa tässä järjestelmässä on pakotettu öljykierto, joka kierrättää öljyä keskimäärin 20 litraa sekunnissa. Muuntajan sisällä käämihäviöt ja paine-ero synnyttävät öljyn virtauksen käämin jäähdytyskanaviin. Käämeistä tuleva kuumin öljy sekoittuu ympäröivään öljyyn, jota jäähdytetään radiaattorilla puhaltamalla tuulettimella ilmaa lämmönvaihtimen läpi. Paranneltavaa tämän järjestelmän käytössä on; tärkeimmät liittyvät tuulettimien ja pumppujen käyttöön.



Kun järjestelmää käytetään ilman tuulettimia, muuntajan kuormitettavuus on 30 %. Ilman öljypumppuja on osa valmistajista ilmoittanut kuormitettavuudeksi 0 %. Tilanteessa jossa tuulettimet ja pumpput eivät ole päällä, muuntajatankki ja öljyputket eivät pysty siirtämään edes tyhjäkäyntihäviöiden lämpötehoa ulos muuntajasta. Tyhjäkäyntihäviöt ovat esimerkkitapauksessa 20 kW ja muuntajahuoneen lämpötilagradientti 30 K, jolloin lämpötehoa tankista ja putkista siirtyisi vain 11,2 kW. Tämä tarkoittaisi lämpöryntäystä hälytykseen ja aina laukaisuun saakka (Kaava 5). Luvussa viisi, mittaustulosten analyysi, käsitellään tarkemmin lämpötilojen asetteluarvojen vaikutuksia OFAF -jäähdytteisillä muuntajilla.

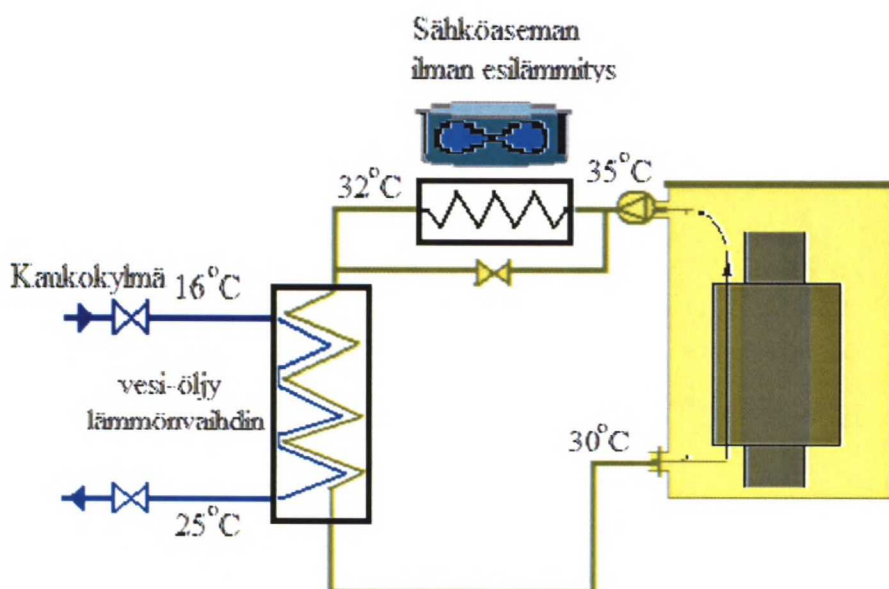
### 3.2.5 Oil Forced Water Forced – OFWF

Erityisesti maanalaisilla sähköasemilla on edullisempaa käyttää pakotettua öljy- ja vesikiertoa jäähdytykseen edellyttäen, että edullista jäähdytysvettä on saatavilla. Pumpuin pakotetun virtauksen johdosta saadaan lämmönvaihtimen kokoa pienennettyä huomattavasti ja tämä on selkeä etu kallioon rakennettaessa. Tärkein etu on kuitenkin, ettei muuntajien jäähdytykseen tarvita kalliita erillisiä pystykuiluja kuten ilmajäähdytyksessä. Huomioitava on, etteivät öljy ja vesi pääse sekoittumaan missään tapauksessa keskenään. Vesi muuntajan sisällä pienemmissä määrin kiihdyttää muuntajan vanhenevista ja suuremmissa määrin synnyttää vaarallisia oikosulkuja. Tähän onkin tarjolla esimerkiksi kahdella kerroksella varustettu lämmönvaihdin, jossa aina veden ja öljyn välillä on ilmakerros. Vuoto tapahtuu siis ilmaan ja siitä vuodon ilmaisijalle, joka on tarpeellinen tällaiselle järjestelmälle, luonnollisesti hälytyksellä varustettuna. /40/



Kuva 26 Varmistettu öljy-vesi lämmönvaihdin, jonka jäähdytysteho on 510 kW.  
Laitteisto on turbiinin jäähdytykseen GEA:n toimittamana. /40/

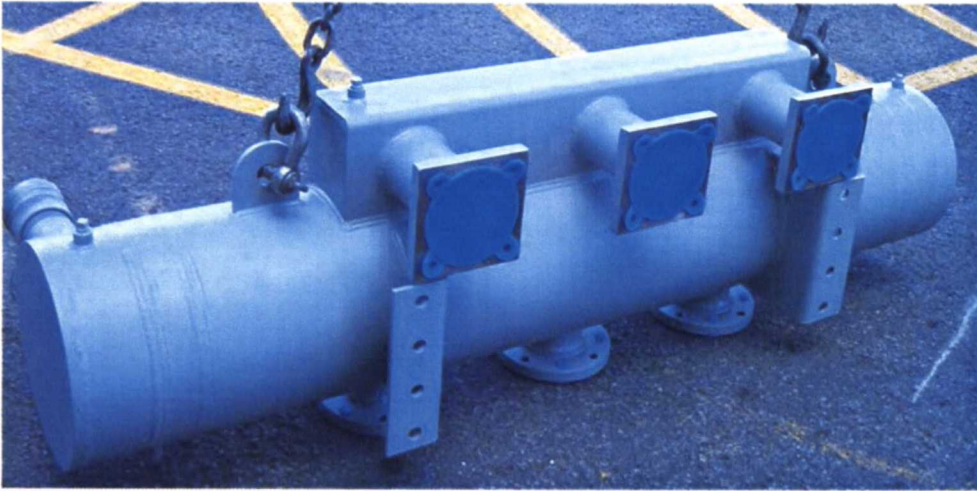
On myös mahdollista käyttää häviölämpöä tarvittaessa esimerkiksi sähköaseman ilman esilämmitykseen, kuten Kampin sähköasemalla tehdään. Tällöin ilman esilämmitys tapahtuisi heti ensimmäisenä, kun öljy tulee muuntajasta noin  $35^{\circ}\text{C}$  lämpötilassa. Öljy jäähtyisi ilman esilämmityksessä muutamia asteita, jonka jälkeen öljy jäähdytetään keskiarvoisesti noin  $25 - 30^{\circ}\text{C}$  lämpötilaan. Seuraavalla sivulla oleva luonnos on yksi mahdollisista menetelmistä esisuunnitteluvaiheessa olevalle Kluuvin sähköasemalle.



Kuva 27 Jäähdytysjärjestelmä ilman esilämmityksellä ja öljy-vesi lämmönvaihtimella.

### 3.2.6 Oil Natural Water Forced – ONWF

Kun öljyn kierto suunnitellaan luonnolliseksi, pitää lämmönvaihtimen virtausvastus olla pieni riittävän virtauksen turvaamiseksi. Virtausnopeutta voidaan myös lisätä tässä tapauksessa nostamalla lämmönvaihdin korkealle muuntajan tasosta.



*Kuva 28 Putkilämmönvaihdin luonnolliselle öljy- ja pakotetulle vesikierrolle, valmistaja Thermofin.*

Helsingin alueella on mahdollista jäähdyttää päämuuntajia myös kaukojäähdytysvedellä. Tällä hetkellä pohdinnan alla ovat kahden maanalaisen sähköaseman päämuuntajien jäähdytysjärjestelmät. Kaukojäähdytysverkossa asiakkaille luvattu kylmän veden lämpötila on korkeintaan  $8^{\circ}\text{C}$  ja asiakkailta palaavan veden lämpötila vaihtelee noin  $16\text{--}18^{\circ}\text{C}$ :n välillä. Paluuputken lämpötila riittää muuntajan jäähdyttämiseen, se on myös sitä edullisempaa mitä korkeammasta lämpötilasta kaukojäähdytysvesi otetaan. Paluuputken laatu on pienempi jäähdytyksen suhteen, sillä paluu putken lämpötila voi vaihdella riippuen edellisen sarjankytketyn asiakkaan jäähdytystarpeesta. Jäähdytysveden lämmönvaihtelu vaatii lisää säätötekniikkaa muuntajan jäähdytykseen tasoittamaan jäähdytystehoa lämpöhäviöiden suhteen. /38/

### 3.3 Muuntajan häviöt ja käyttölämpötila

Muuntajassa syntyy häviöitä, jotka vapautuvat lämmöksi sisällä rakenteissa. Pääosin häviöt voidaan jakaa tyhjäkäynti- ja kuormitushäviöihin (Kaava 10).



$$P_{Kok} = P_t + P_k \quad (10)$$

Tyhjäkäyntihäviöt ovat pääosin rautahäviöitä, joita vaihteleva magneettikenttä aiheuttaa. Rautahäviöt muodostuvat hystereesi- ja pyörrevirtahäviöistä, jotka riippuvat vain jännitteestä. Vaihtokenttä indusoi rautaan jännitteitä, aiheuttaen virtoja raudan muodostamissa suljetuissa virtapiireissä. Kuormitushäviöt ovat pääasiassa käämien resistiivisiä häviöitä ja verrannollisia virran neliöön. Nimellisjännitteellä tyhjäkäyntihäviöt pysyvät käyttöönottokokeen nimellisarvossa. Toisiojännitteen pysyessä suunnilleen vakiona kuormitushäviöt ovat verrannolliset suhteellisen kuormituksen  $s$  neliöön. /8/

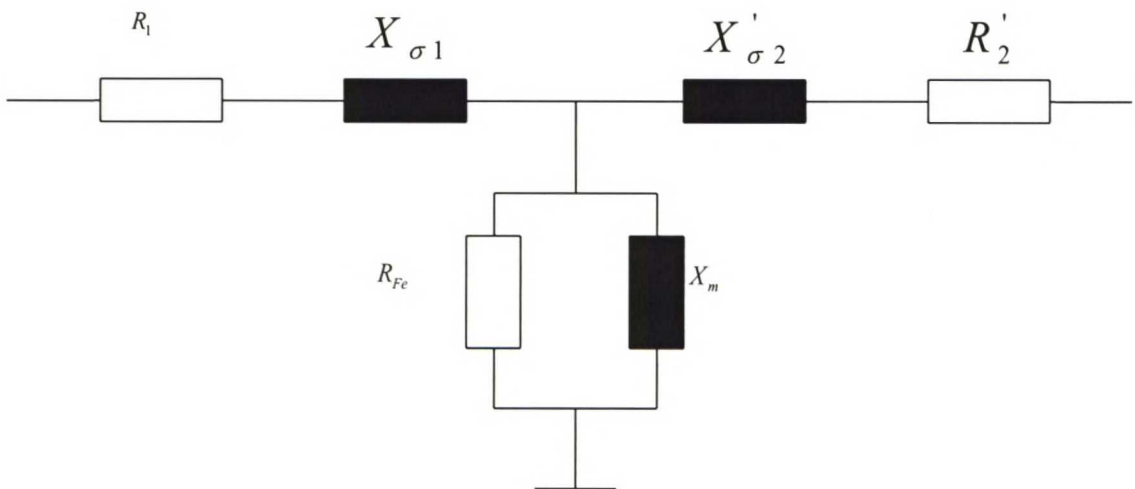
$$P_k = R_k I^2 = R_k I_N^2 \left( \frac{I}{I_N} \right)^2 = P_{kN} s^2 \quad (11)$$

$$p_t = \frac{P_t}{S_N} \quad (12)$$

Suhteellisarvot ovat:

$$p_k = \frac{P_k}{S_N} = r_k s^2 \quad (13)$$

Muuntajan sijaiskytkentä:



Käämihäviöt koostuvat resistiivisistä- ja pyörrevirtahäviöistä.

$$P_{Totw} = P_{DC} + P_{Eddy} \quad (14)$$

Nämä häviöt käyttäytyvät keskenään päinvastaisesti lämpötilan funktiona: resistanssihäviöt kasvavat ja pyörrevirtahäviöt pienenevät lämpötilan noustessa. Kuitenkin resistiivisten häviöiden osuus on hallitsevampi kokonaiskäämihäviöiden kannalta. /25/ /28/

$$P_{Totw} = P_{DC} \frac{\beta + \theta_T}{\beta + \theta_{75^{\circ}C}} + P_{Eddy} \frac{\beta + \theta_{75^{\circ}C}}{\beta + \theta_T}$$

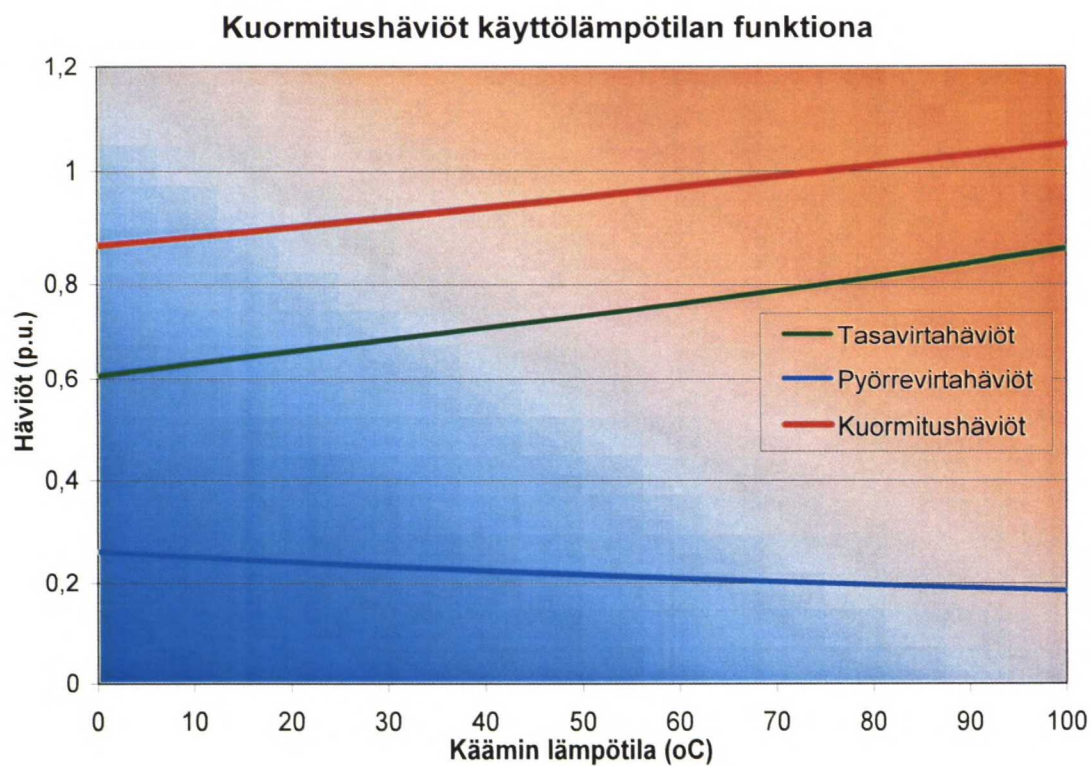
(15)

$\beta$  = Lämpötilakertoimen käänteisarvo, kuparille 234,5 °C

Taulukko 11 Kuormitushäviöiden käyttäytyminen käyntilämpötilan funktiona.

Hot-spot lämpötila $\theta_T$	Kuormitushäviöt $P_{Totw}$	Resistiivisethäviöt	Pyörrevirtahäviöt
0	0,870	= 0,606	+ 0,264
20	0,901	= 0,658	+ 0,243
40	0,935	= 0,710	+ 0,225
60	0,971	= 0,761	+ 0,210
70	0,990	= 0,787	+ 0,203
75	1,000	= 0,800	+ 0,200
90	1,029	= 0,839	+ 0,191
100	1,050	= 0,865	+ 0,185

Sähköaseman tyypillisellä kuormitusasteella 50 % käyntilämpötilaa alennettaessa saadaan käämihäviöitä pienennettyä reilun kilowatin verran. Tämän vaikutus ei ole merkittävä, mutta kuormituksen kasvaessa nousevat myös käämihäviöt virran neliöön riippuvaisina. Täydellä kuormituksella käyttölämpötilan alentaminen pienentää käämihäviöitä noin neljä kilowattia. /25/



Kuva 29 Kuormitushäviöt nimelliskuormalla käämin keskiarvoisen lämpötilan funktiona.



## 4 Päämuuntajien tutkimus

Yksityiskohtaisen tiedon saamiseksi tehdään mittausjärjestelyt yhdelle sähköasemalle (Liite 1). Pakotetulla öljy- ja ilmakierrolla toteutettuja päämuuntajan jäähdytysjärjestelmiä on 26 kohteessa, loput 17 muuntajaa on jäähdytetty luonnollisella öljy- ja pakotetulla ilmakierrolla. Jokaisella sähköasemalla on muuntajakohtaisesti määritelty radiaattorin tuulettimen käynnistymislämpötila. Esimerkiksi Kampin sähköaseman jäähdytysjärjestelmä on toteutettu jokaista muuntajaa kohden kahdella erillisjäähdyttimellä, kun Pasilassa on yksi jäähdytin muuntajaa kohti. Jokaista tapausta käsitellessä on siis otettava huomioon laitteistokohtaiset ja säätötekniset ominaisuudet.

### 4.1 Kohteen valinta

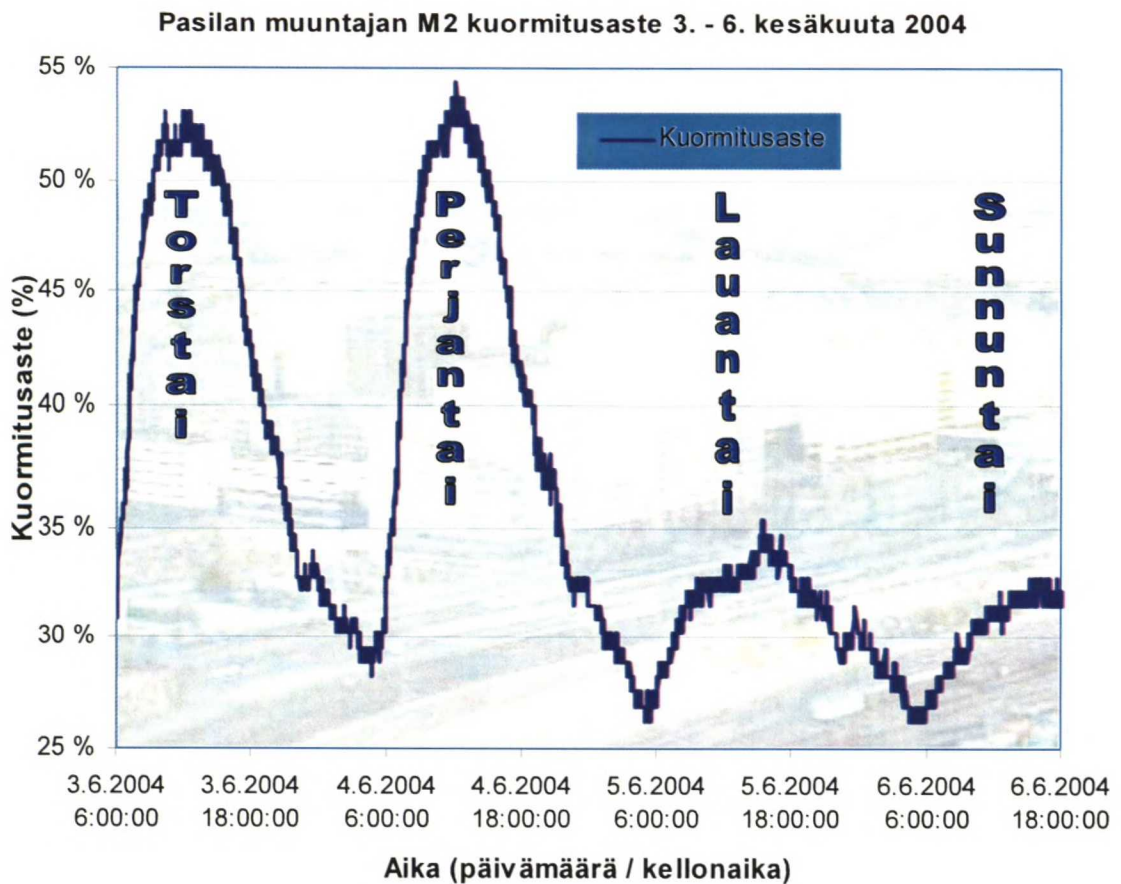
Vuonna 2003 loka-marraskuussa Fortumin tutkimuslaboratorion kaasuanalyysien perusteella annettiin vikatyypimerkintä kymmenelle päämuuntajalle. Vikatyypin 11 annetaan termisestä viasta tai öljyn / paperin vanhenemisesta. Kyseistä vikatyypin 11 löytyi viidessä päämuuntajassa hiilimonoksidin tarkkailurajan ylittyessä. Vikatyypin 12 annetaan käämikytkimen toiminnasta syntyvän asetyleni-kaasun siirtyessä joko yhteisen paisuntasäiliön kautta tai suoraan käämikytkintilasta muuntajasäiliöön. Asetylenin tarkkailuraja ylittyi viidessä päämuuntajassa. /14/

Ensisijainen mittauskohde on Pasilan sähköaseman päämuuntajat; vuoden 2003 virtatietojen perusteella muuntajia kuormitetaan keskiarvoisesti 37 % ja 42 % nimellisvirrasta, joka on 1100 ampeeria. Päämuuntajien jäähdytysöljyn kierto on aina keskipakopumpulla pakotettu, kun muuntajat ovat käytössä. Radiaattorin tuuletinta ohjataan termostaatilla muuntajan huippuöljyn funktiona tai vaihtoehtoisesti käsikäytöllä. Tähän mennessä huippuöljyn termostaatti, joka kytkee tuulettimen päälle, on asetettu noin 55°C:n lämpötilaan Pasilan sähköasemalla. Huippuöljyn lämpötilojen perusteella ohjataan yleisesti kaikkia päämuuntajien tuulettimia Helsingin Energiassa. Lämpötilaratat vaihtelevat eri valmistajien suosituksien mukaan 50 – 80°C:n välillä.

Muun muassa muuntajien valmistaja Koncar suosittelee korkeimpia lämpötiloja tuulettimen päälle kytkemiseksi; päämuuntajissa onkin havaittu hiilioksidien muodostumista yli Fortumin suositusten. Tavoitteena on tarkastaa periaatteet muuntajien käyttölämpöti-

loille ja tarpeen vaatiessa muuttaa lämpötilarajoja päämuuntajien tuulettimille. Tämä mahdollistuu tutkimalla päämuuntajien kuormituksia, jäähdytysjärjestelmän käyttöä ja muuntajaöljynäytteiden analyysejä rinnakkain.

Pasilan alueella on paljon toimistorakennuksia, joka on nähtävissä sähköaseman muuntajan M2 kuormituskäyrästä.



*Kuva 30 Pasilan sähköaseman tyypillinen kuormitusaste muuntajalla M2.*

Työpäivinä päämuuntajan M2 kuormituskäyrän huippu löytyy kello 7 ja 17 väliltä, viikonloppuisin toimistojen ollessa kiinni kuormitusaste laskee noin 20 %. Kesällä kuormitusaste laskee keskiarvoisesti noin viisi prosenttia talveen verrattuna. Syksyllä 2003 kuormitus oli poikkeuksellisen suuri muuntajalla M1, mutta poikkeustilanteiden vaikutukset lämpöhäviöiden suhteen otetaan huomioon kuormitustietojen avulla.

Taulukko 12 Päämuuntajan M2 jäähdytysjärjestelmän tekniset arvot.

<b>Radiaattorin tuuletin ABB 1-5012-2-3</b>		<b>Öljypumppu ABS VMOA_LF 350 188-C</b>	
Jäähdytyskapasiteetti	126 kW	Jännite	3 x 380 V
Öljyn virtauksella	21 l/s	Nimellisvirta	7,7 A
Tällöin lämmön pudotus	3,5 K	Käynnistysvirta	58 A
Ilman virtauksella	5,5 m <sup>3</sup> /s	Nimellisteho	3,8 kW
Jännite	3 x 380 V	Moottorin syöttö	2,2 kW
Nimellisteho	1,3 kW	Nopeus	1430 rpm
Nimellisvirta	6,3 A		
Käynnistysvirta	20 A		
Nopeus	475 rpm		

#### 4.2 Päämuuntajan jäähdytysjärjestelmän mittaus

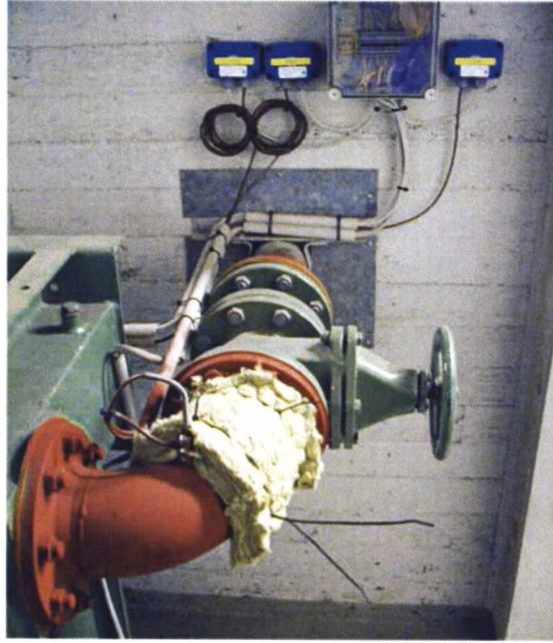
Tätä tutkimusta varten Pasilan sähköasemalle on asennettu paikallinen jäähdytysjärjestelmän mittauslaitteisto. Laitteistoon kuuluu 18 lämpötila-anturia signaalin vahvistimiseen ja kaksi virtausmittaria. Lämpötila-antureita on kolmea eri tyyppiä; ilman, öljyputken ja -taskun lämpötilan seurantaan varten. Ilman lämpötilamittareiden toiminta-alue on  $-30^{\circ}\text{C} \Leftrightarrow 60^{\circ}\text{C}$  ja öljyputken ja -taskun antureiden toiminta-alue on  $0^{\circ}\text{C} \Leftrightarrow 120^{\circ}\text{C}$ . Antureiden tarkkuus on 0,15 % toiminta-alueesta, ilma-antureiden kohdalla se tarkoittaa  $\pm 0,14^{\circ}\text{C}$  ja putkiantureiden  $\pm 0,18^{\circ}\text{C}$ .



Kuva 31 Öljyputkeen asennettu PT-100 anturi ja signaalin muunnin, asennusvaiheessa ja villalla eristettynä.



Kaksi lämpötila-anturia asennettiin putken sisälle mittatilaustyönä tehtyihin öljytaskuihin. Öljytaskujen viereen on asennettu anturit putken päälle, jotta mittaustuloksista saadaan referenssiarvot putken päältä ja sisältä mitatun lämpötilan suhteen.



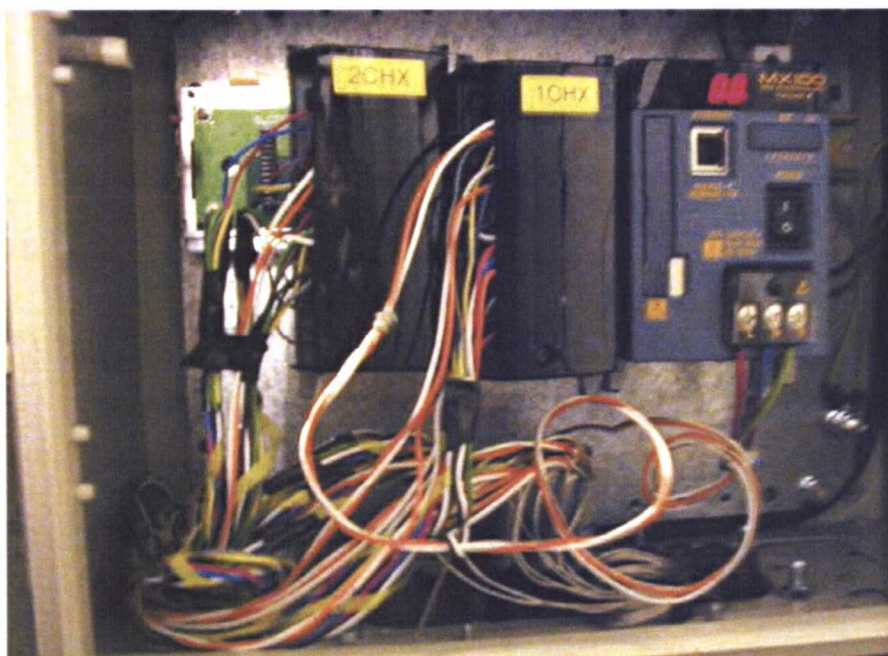
*Kuva 32 Radiaattorin M1 sisään menevän öljyn lämpötilan mittausta öljytaskusta ja putken päältä.*

Molemmille päämuuntajille on asennettu virtausmittarit, jotka antavat milliampeeritiedon jäähdytysöljyn virtauksesta keskusyksikölle. Mittareiden lukualue on  $200 - 2000 \text{ l/min}$  ja tarkkuus on  $\pm 5\%$  maksimi näyttämästä. Virtausmittarin tyyppi on valittu öljypumpuille joiden teho on noin 6 kW ja öljyn kiertonopeus on välillä  $1000 - 1600 \text{ l/min}$  pumpun ollessa päällä. Kaikki Pasilan sähköaseman neljä jäähdytysöljyn pumppua ovat keskipakopumppuja, ilman pumppujen toimintaa öljyn virtaus ei ylitä mittarin minimi näyttämää, joka on  $3,3 \text{ l/s}$ .



*Kuva 33 Pasilan pääuuntajan M2 keskipakoöljypumput ja virtausmittari.*

Jokainen anturi kiinnittyy lähetysvahvistimen kautta keskusyksikköön, joka on muuntajabunkkerissa M2. Lähetysvahvistimet parantavat tarkkuutta ja pienentävät päämuuntajan läheisyydessä olevien magneettikenttien huomattavan vaikutuksen. Jännite anturin yli vaihtelee resistanssin muuttuessa lämpötilan suhteen. Keskusyksikössä signaali skaalataan virtatiedoksi 5 – 25 mA asteikolle. Keskusyksikössä on 20 mittauskanavaa, kaikki ovat käytössä, tarpeen vaatiessa voidaan laajentaa mittauskanavia kymmenen sisäänmenon lisäkortilla, jonka hinta on noin 1000 €.



*Kuva 34 Mittauslaitteiston MX-100 keskusyksikkö, jonne kaikki tieto kerätään, valmistaja Yokokawa.*



Keskusyksikössä on ethernet-liitäntä, joka voidaan kytkeä verkkoon tai suoraan tietokoneeseen. Tässä tutkimuksessa tiedot luetaan kannettavalla tietokoneella, vähintään kolmen kuukauden välein. Keskusyksikössä on CF-muistipaikka, jossa on käytetty 512 megatavun muistikorttia. Kun kannettavan ethernet-yhteys katkaistaan keskusyksiköön, aloittaa automaatio tiedon tallentamisen muistikortille. Seurattavien kanavien määrästä, tallennuskapasiteetista ja -tiheydestä riippuen kortti toimii seuraavan taulukon mukaisesti:

*Taulukko 13 Keskusyksikön tallennuskapasiteetti muistin koon ja kanavien mukaan /2/.*

Number of Saved CHs	Measurement Interval	Capacity of the CF card				
		32 MB (6 files)	64 MB (12 files)	128 MB (25 files)	256 MB (51 files)	512 MB (102 files)
10 CHs	10 ms	2 hours	4 hours	9 hours	18 hours	36 hours
	50 ms	10 hours	21 hours	45 hours	3 days	7 days
	100 ms	21 hours	43 hours	3.5 days	7 days	15 days
	200 ms	43 hours	3 days	7 days	15 days	30 days
	500 ms	4.5 days	9 days	18.5 days	38 days	75.5 days
	1 s	9 days	18 days	37 days	77 days	154 days
	2 s	18 days	36 days	75.5 days	154 days	303 days
24 CHs	10 ms	54 min.	1 hour40 min.	3.5 hours	7 hours	15 hours
	50 ms	4 hours	9 hours	18 hours	38 hours	77 hours
	100 ms	9 hours	18 hours	37 hours	77 hours	6 days
	200 ms	18 hours	36 hours	75 hours	6 days	12 days
	500 ms	45 hours	3 days	7.5 days	16 days	31.5 days
	1 s	3 days	7 days	15 days	32 days	64 days
	2 s	7.5 days	15 days	31.5 days	64 days	126 days
60 CHs	10 ms	18 min.	40 min.	1 hour15 min.	3 hours	5 hours
	50 ms	1 hour	3 hours	7 hours	15 hours	30 hours
	100 ms	3.5 hours	7 hours	15 hours	30 hours	2.5 days
	200 ms	7 hours	14 hours	30 hours	2 days	5 days
	500 ms	18 hours	36 hours	3 days	6 days	12.5 days
	1 s	36 hours	3 days	6 days	12 days	25 days
	2 s	3 days	6 days	12.5 days	25 days	50 days

Tämän tutkimuksen mittaustajuuudeksi on valittu yksi näyte minuutissa. Tarkkuus on riittävä sillä jäähdytysjärjestelmässä tapahtuvat aikavakiot ovat suurempia.

4.2.1 Referenssimittaus öljytasku- ja putki antureille

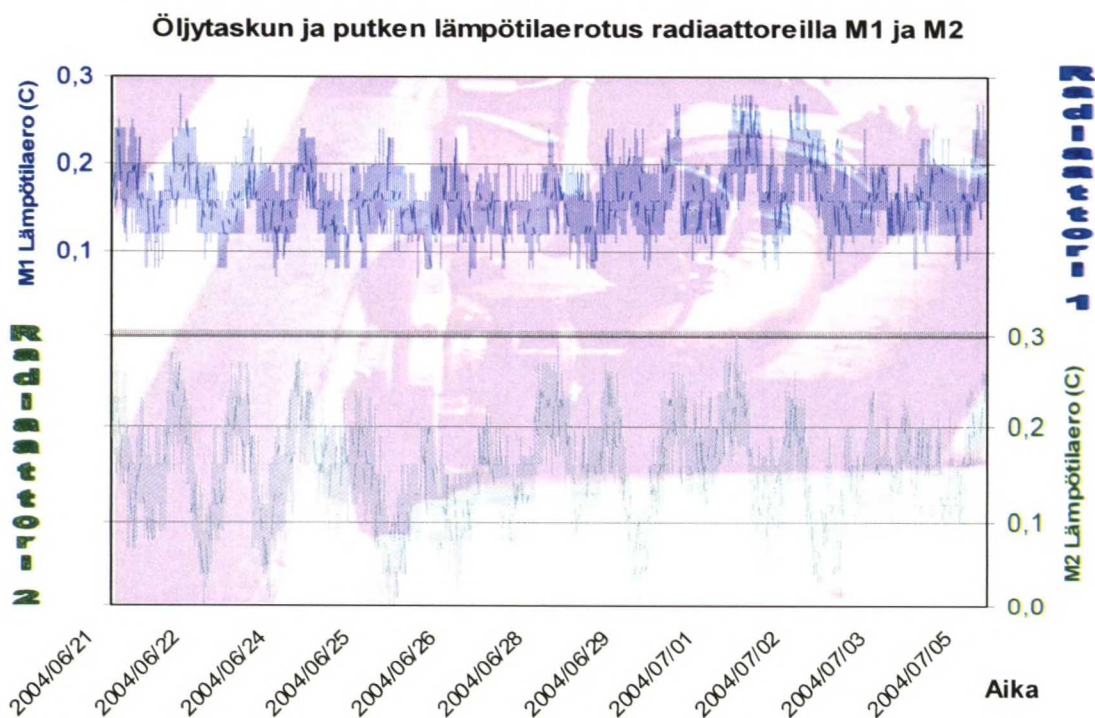
Öljyputken päälle asennettuja lämpötila-antureita on kahdeksan ja öljytaskuun asennettuja kaksi. Nämä antavat mittausten tärkeintä tietoa. Näiden antureiden avulla saadaan määritettyä jäähdytysöljyn lämpötilan muutokset kiertosysteemeissä. Öljytaskujen antama lämpötilatieto on tarkempaa verrattaessa putken päälle asennettuihin antureihin ja samalla myös kalliimpaa, sillä putki taskuineen joudutaan teettämään mittatilaustyönä tapauskohtaisesti. Sen vuoksi mittausjärjestelmään suunniteltiin referenssipisteet öljytaskun ja putkeen asennettavien antureiden suhteen.





Kuva 35 radiaattoriin M1 menevä jäähdytysöljyputki, johon on asennettu anturit öljytaskuun sekä putken päälle.

Pinta-anturi on eristetty ympäröivästä ilmasta villalla molempien muuntajien radiaattorilla.



Kuva 36 Rerenssimittaus öljytasku ja pinta-antureille Pasilan sähköasemalla.

Keskiarvoinen lämpötilaerotus öljytaskuun ja putken pintaan asennetulla anturilla on  $0,15^{\circ}\text{C}$ . Lämpötilaero on verrannollinen muutosnopeuteen: lämpötilaeron huippukoh-

dat näkyvät selkeästi olevan huipussaan arkipäivinä, jolloin suuremmasta päämuuntajan kuormituksesta seuraa lämpötilaeron kasvu. Radiaattorin tuulettimen ollessa päällä erotus kasvaa kesäolosuhteissa korkeintaan arvoon 0,3 °C . Muuntajan 2 radiaattori on tehokkaampi jäähdyttämään, mikä näkyy suurempana lämpötilaeron vaihteluna kuvaajassa.

4.3 Tarkennettu mittaus käytönvalvontajärjestelmästä

Päämuuntajien tutkimusta varten on luotu tunnuksia datapisteille, joiden nimeämänä arvoja voidaan siirtää käytönvalvontajärjestelmästä tallennettavaksi. Identifikaatiota kutsutaan elcom -tunnisteeksi. Siirrettäviä datapisteitä on yhteensä 24, joista suurin osa on lämpöarvoja:

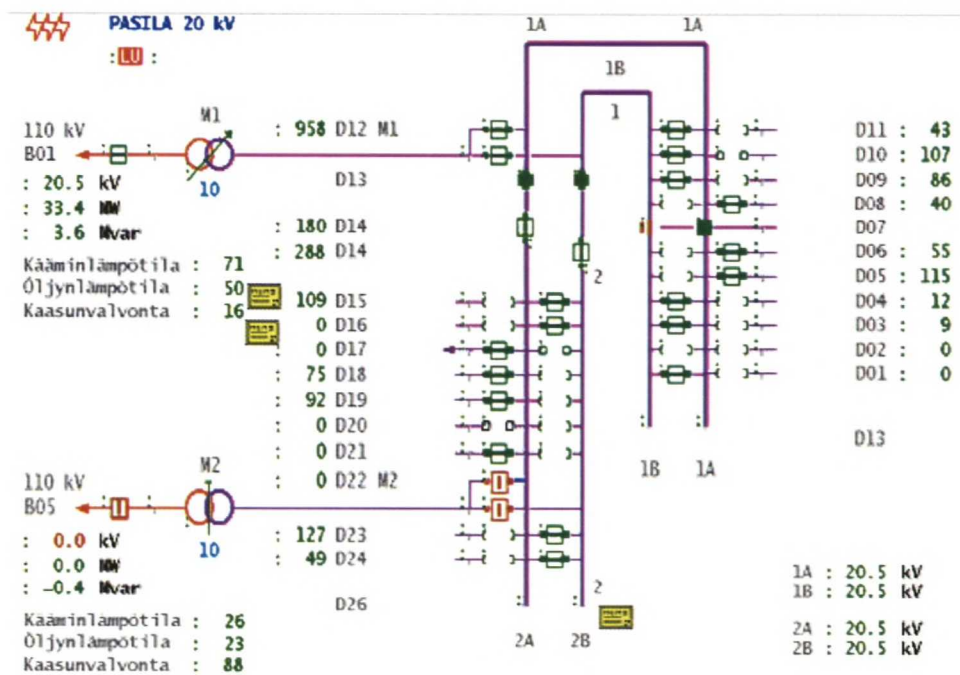
Taulukko 14 Tutkimusta varten kerätyt tiedot kolmelta eri sähköasemalta.

<b>Pasilan sähköasema M1 M2</b>	Toisiovirta
	Kääminlämpötilakuvaaja
	Huippuöljyn lämpötila
	Kaasun valvonta – Hydran
<b>Kampin sähköasema M1 M2</b>	Toisiovirta
	Kääminlämpötilakuvaaja
	Huippuöljyn lämpötila
<b>Pitäjänmäen sähköasema M1 M2 M3</b>	Toisiovirta
	Kääminlämpötilakuvaaja
	Huippuöljyn lämpötila
<b>Helsingin ulkolämpötila</b>	Lämpöanturi Sähkötalon katolla Kampissa

Käytönvalvontajärjestelmästä saadut elcom -arvot tallennetaan verkon järjestelmien toimesta palvelimelle loki-tiedostoon noin minuutin välein. Yhden vuorokauden aikana kertyy noin 60 megatavua mittaustietoa. Prosessiarvojen löytäminen isosta loki-tiedostosta vaatii erillisen ohjelman, joka hakee haluttujen elcom -tunnusten arvoja SQL- tietokantajärjestelmään. Tietokantajärjestelyn ohjelmoivat Heikki Pitsinki ja Taina Haverinen Helenin konsernipalveluista tutkimusta varten. Scada -tietojen tarkkuudesta löytyy tietoa Jani Ahokkaan Helsingin Energialle tekemästä insinööritoiminnasta: ”Verkontietojärjestelmän tehojakolaskennan käyttöönotto käytönsuunnittelussa”.

#### 4.4 Kuormitushäviöt

Muuntajan käyttöönottokokeessa tehtaalla mitataan kuormitushäviöt. Häviöt syntyvät muuntajan rakenteissa ja siihen vaikuttavia tekijöitä ovat muun muassa: johtimien poikkipinnat ja materiaali, sydänlevyn ominaisuudet paksuus ja suuntaus sekä tankin rakenne. Jäähdytysjärjestelmää analysoitaessa on varmistettava muuntajan tuottama lämpökuorma ja tämä tehdään kuormitushäviömittauksella. Molemmille Pasilan päämuuntajille on siis vastaanottokokeissa määritetty kuormitushäviöt. Muuntajat ovat rakenteeltaan samanlaisia, joten myös häviöt ovat samansuuruiset. Tarkistusmittaus tehtiin päämuuntajalle M2. Se kytkettiin irti verkosta 11.6.2004 perjantai-iltapäivänä jäähtymään maanantaisia kokeita varten. Muuntaja pidettiin kuitenkin käyttöönotettavissa viikonlopun ajan. Maadoitukset kytkettiin maanantaiaamuna ja poistettiin iltapäivällä kokeiden jälkeen keskeytysmääräyksen mukaisesti, joka löytyy lopussa liitteenä (3).

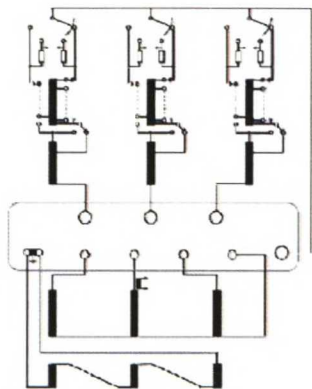


Kuva 37 Sähkövalvomon tilannekuva Pasilan päämuuntajista ja keskijännitelähdöistä 14.6.04 kello 15:22:10; päämuuntaja M2 on kytketty jännitteettömäksi.

Aloitettaessa muuntajan M2 huippuöljyn lämpötila oli  $23^{\circ}\text{C}$ , joten muuntajan lämpötila on ehtinyt täysin tasaantua viikonlopun aikana, jolloin jäähtymistä tehostettiin tuulettimen pakkokäytöllä sunnuntai-iltapäivään asti.



Tehdasmittaukset on tehty jokaisella käämikytkimen asennolla, joita on 19 ensiöjännitealueen vaihteluvälillä 97,7 - 132,3 kV. Muuntajan M2 resistanssimittaukset yläjännitekäämille tehtiin voltti-ampeeri menetelmällä kolmella eri käämikytkimen asennolla: keskimmaisella ja äärimmäisillä asennoilla. Alajännitekäämin resistanssi mitattiin siltamenetelmällä.



*Kuva 38 Helsingin Energian asentaja Juhani Viksten Pasilassa muuntajan M2 käämikytkimen vieressä mittauspäivänä 14.6.2004.*

Kuormitushäviöt mitattiin syöttämällä yläjännitepuolelta kolmivaiheisesti 480 voltin säätömuuntajalla alajännitepuolen ollessa oikosuljettuna. Mitatut kuormitushäviöt redusoiitiin 20°C lämpötilaan, jotta ne olisivat vertailukelpoisia valmistajan määrittämien arvojen kanssa. Käämiresistanssien ja kuormitushäviöiden mittau tulokset ovat lähes yhteneviä vastaanottokokeisiin verrattuna.

*Taulukko 15 Käämiresistanssien vertailu redusoituna 20°C lämpötilaan.*

Käämikytkimen asento	Tehdasmittaukset (Ω)			Tarkastusmittaukset (Ω)		
1	1,204	1,204	1,204	1,202	1,204	1,205
10	0,991	0,990	0,989	0,987	0,987	0,988
19	0,833	0,834	0,832	0,831	0,832	0,832

Vertaillessa resistanssien arvoja keskimääräinen ero on vain muutaman promillen luokkaa.

*Taulukko 16 Kuormitushäviömittaukset redusoituna nimellisvirtaan ja 75°C lämpötilaan.*

Käämikytkimen asento	Kuormitushäviöt (W)	Kuparihäviöt (W)	Lisähäviöt (W)	Oikosulku-	
				impedanssi	resistanssi
1	149 675	131 153	18 522	13,01 %	0,374 %
10	152 121	136 860	15 261	11,95 %	0,380 %
19	162 658	148 933	13 725	11,16 %	0,407 %

Suurin noin yhden kilowatin ero kuormitushäviöissä tehtaalla mitattuihin tuloksiin saatiin ensimmäisellä käämikytkimen asennolla. Muuten mittaustulosten erotus on keskimäärin vain alle puoli prosenttia.

*Taulukko 17 Tehtaalla vastaanottokokeessa mitatut häviöarvot.*

Kuormitushäviöt 75 °C	$P_K$ , as 1	148,7 kW
	$P_K$ , as 10	151,4 kW
	$P_K$ , as 19	162,3 kW
Kuparihäviöt 75 °C	$P_T$ , as 1	130,9 kW
	$P_T$ , as 10	136,8 kW
	$P_T$ , as 19	148,9 kW
Lisähäviöt 75 °C	$P_L$ , as 1	17,7 kW
	$P_L$ , as 10	14,6 kW
	$P_L$ , as 19	13,4 kW

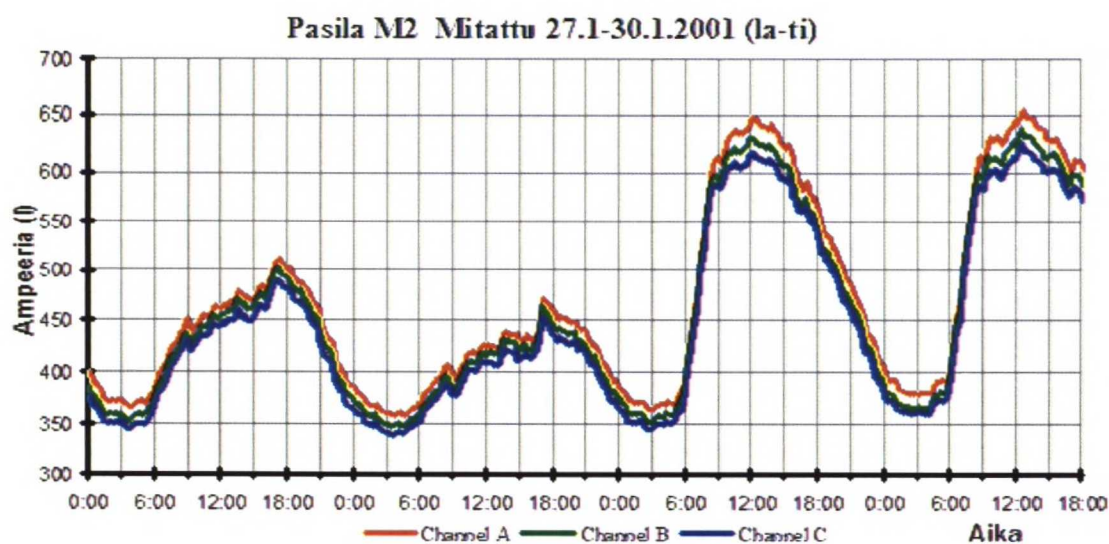


*Kuva 39 Mauri Aroranta ja Juhani Viksten ovat irrottamassa muuntajan 110 kV yläjännitepuolen kiinnitystä kytkien 480 voltin säätömuuntajan mittausjärjestelyiden syöttöä varten.*

Kuormitushäviöiden tarkastusmittaukset varmistavat muuntajan rakenteiden olevan sähköteknisien arvojen osalta kunnossa.

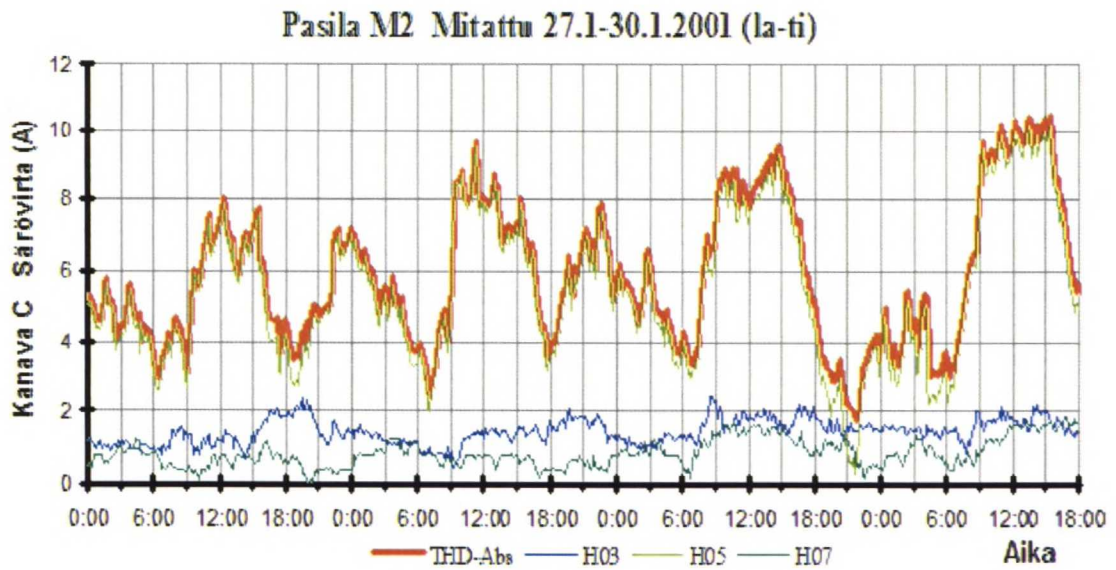
#### 4.5 Virran särökerroin THD

Virran säröytyminen synnyttää muuntajan sisälle magneettikenttiä, jotka synnyttävät pyörrevirtoja tuottaen lisää lämpökuormaa. Merkittävästi tämä vaikuttaa kun virran särökerroin lähestyy arvoa 10 %. Suurin merkitys virran harmonisilla taajuuksilla on käämihäviöihin, jolloin lämpötila nousee oletusarvoisesti kriittisimmässä paikassa – käämin yläosassa. Pasilan sähköasemalla on mitattu virran säröytymistä viimeksi vuonna 2001 ja tilanne ei ole oleellisesti asian suhteen muuttunut, vaikka uudet päämuuntajat on asennettu vuonna 2002. /4/ /15/



Kuva 40 Vaihevirtojen mittaus muuntajalla M2.





*Kuva 41 Särövirran itseisarvo ja kolmen ensimmäisen parittoman yliaallon mittaustulokset.*

Pääosin särövirta koostuu viidennestä yliaallosta, jonka taajuus on 250 hertsiä. Korkeimmillaankin edellinen on alle kaksi prosenttia perusaallosta, eikä sillä siten ole merkittävää vaikutusta muuntajan lämpöhäviöihin. /26/

#### 4.5.1 Tankin lämpötila laser-mittarilla

Muuntaja tankin laser-lämpötilamittaus on nopein tarkistus mahdollisien säiliövirtojen aiheuttamien lämpötilojen suhteen. Mittaukset muuntajalta M1 26 eri paikasta osoittivat tankin korkeimmaksi lämpötilaeroksi 2,9K ja muuntajalla M2 3,5K.



Edestä

27,4	27,7	27,4
25,4	25,1	25,9
25,2	26,4	26,0

Oikea

26,4
26,1

Vasen

28,1
25,7

Takaa

26,8	27,8	27,6
25,8	25,8	26,3
25,8	26,2	26,1

*Kuva 42 Muuntajatankin M1 keskiosasta ylhäältä mitattu lämpötila ja mittauskohdat muuntajan sivuilta 7.6.2004.*

Lämpötiloja pystytään myös mittaamaan jännitteisistä osista kuten jännitekiskoista ja liitoksista laser-lämpötilamittarilla. Kuten seuraavassa kuvassa 43 mitataan lämpötila 110 kV:n läpiviennin alaosa.

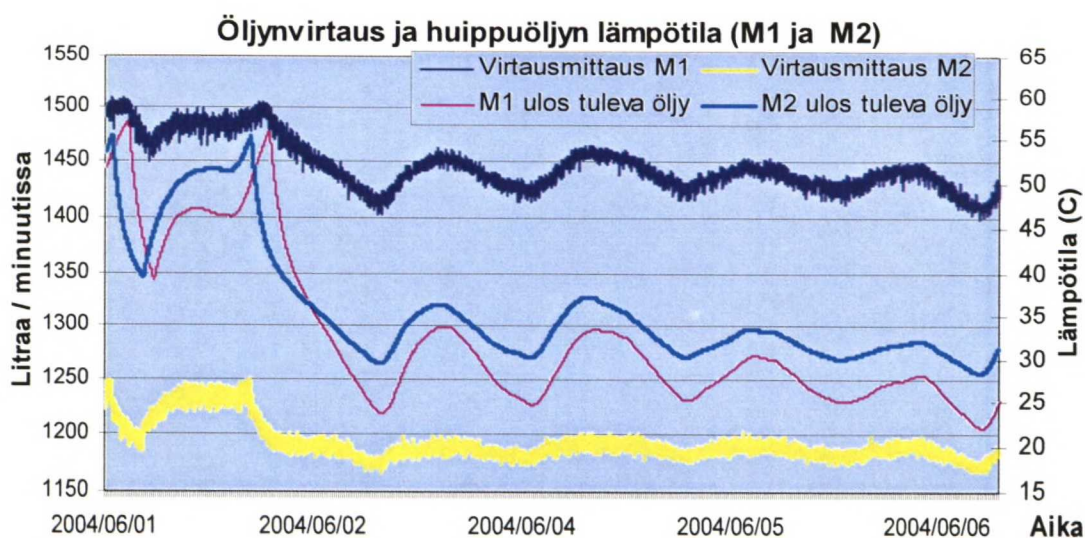


*Kuva 43 Muuntajan M1 110 kV:n läpivientieristimen tankin kiinnityskohta on 30,5° C lämpötilassa.*

#### 4.6 Yhteenveto mittausjärjestelyistä

Pasilan päämuuntajille on tehty todella lukuisia mittauksia jäähdytysjärjestelmän osalta, käytännössä seuraava vaihe olisi avata muuntaja ja katsoa sisälle. Tähän ei kuitenkaan ole tarvetta, sillä kaikilla näillä mittauksilla saadaan riittävän tarkkaa tietoa päämuuntajan ja jäähdytysjärjestelmän käyttöä koskien.

Mittaustietoa siis saadaan muuntajien ulkoisesta jäähdytysjärjestelmästä paikallisella mittauslaitteistolla, muuntajan kaasuista öljyanalyysin ja Hydranilla. Lämpökameralla on tutkittu paikallisia lämpenemiä muuntajatankissa ja jäähdytyslaitteistossa. Lisäksi myös kuormitushäviöt mitattiin muuntajalta M2 14.6.2004.

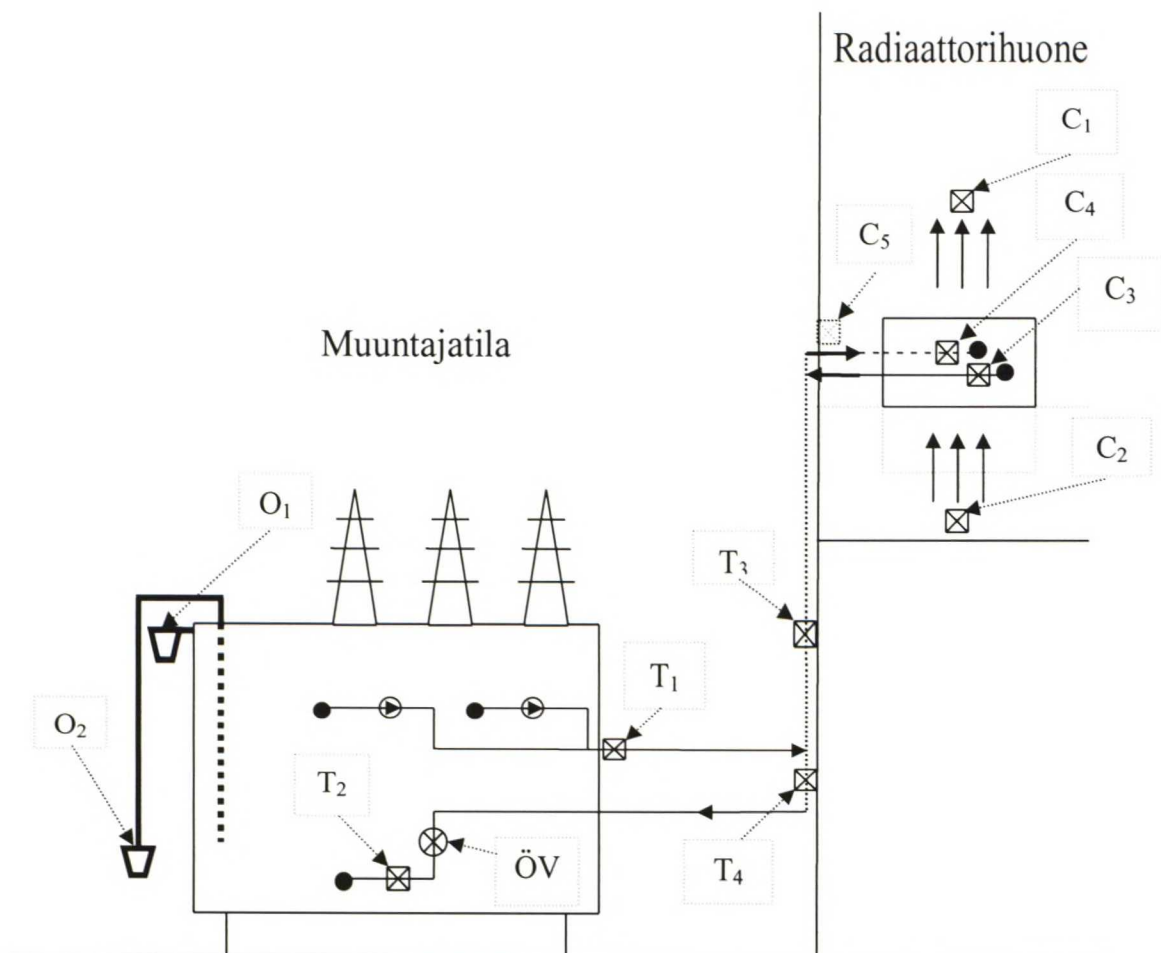


Kuva 44 Öljynvirtausnopeudet ja huippuöljyn lämpötilat Pasilan päämuuntajille tuulettimen kokoaikaiselle käytölle siirryttäessä.

Uudet öljynvirtausmittarit, jotka antavat milliampeeri-tiedon tallennettavaan muotoon, ovat suositeltava lisäys päämuuntajien hankintaohjelmaan.

Seuraavalla sivulla on rakennekuva päämuuntajan M1 mittausjärjestelyistä ja tämä pätee myös Pasilan toiselle päämuuntajalle, lukuun ottamatta radiaattorille menevän ilman  $C_2$  mittauksia ja toista radiaattorihuoneen lämpötila-anturia  $C_5$ .





Kuva 45 Mittausjärjestelyiden rakenne Pasilan päämuuntajalla M1.

$C_1$  Radiaattorista poistuva ilma

$C_2$  Sisään tuleva ilma

$C_3$  Radiaattorista poistuva öljy

$C_4$  Radiaattoriin tuleva öljy + öljytasquanturi

$C_5$  Radiaattorihuoneen lämpötila

$T_1$  Muuntajasta tuleva öljy

$T_2$  Muuntajaan menevä öljy

$T_3$  Muuntajahuoneen lämpötila (4m)

$T_4$  Muuntajahuoneen lämpötila (1,5m)  $O_1$  Öljynäytteen otto yläöljystä

$O_2$  Öljynäytteen otto alaöljystä

ÖV Öljyn virtausmittari

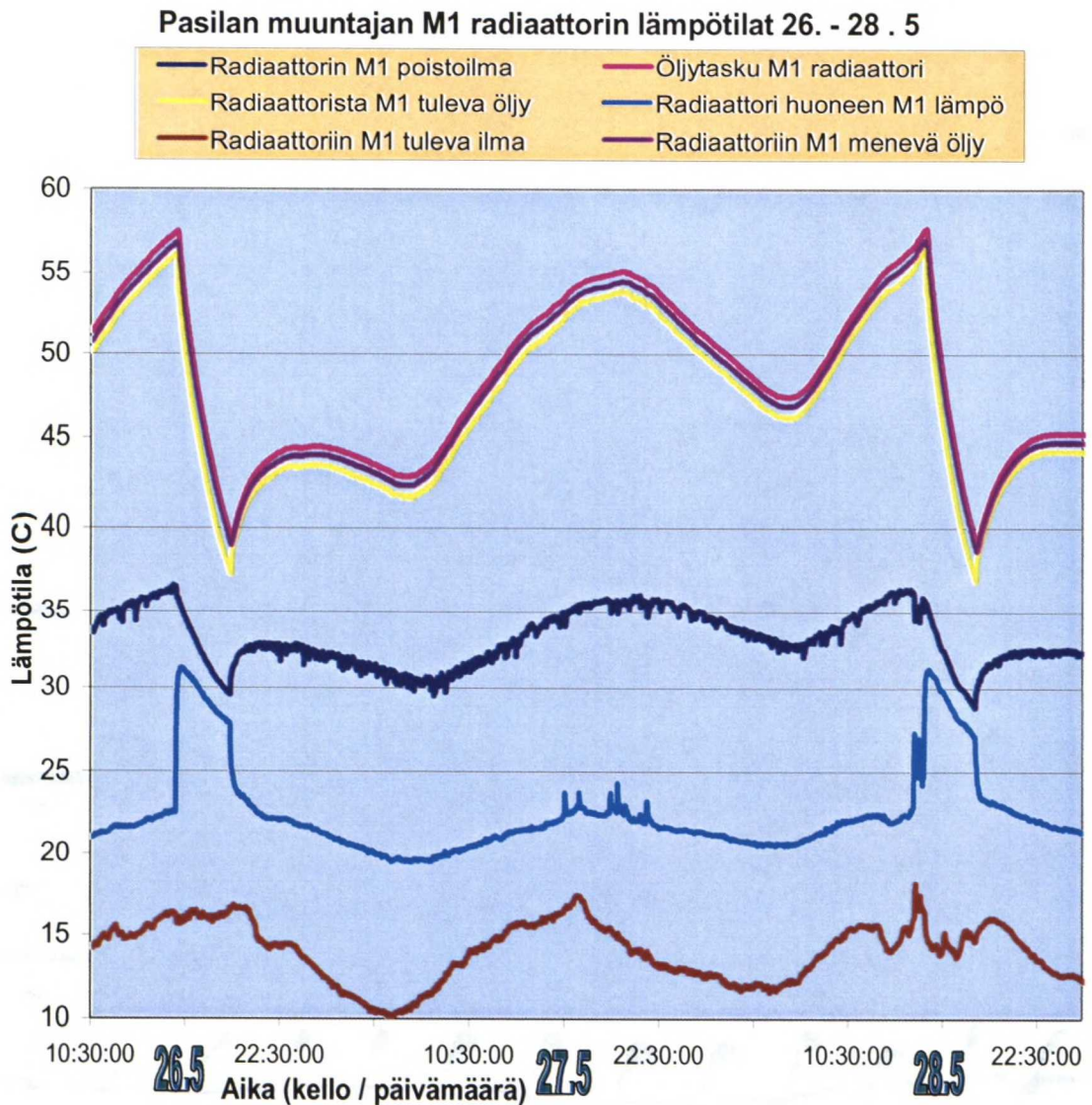
Lisäksi kaikilla muuntajilla on huippuöljyn lämpötila ja käämin lämpötilakuvaajan mittaussakina.

## 5 Mittaustulosten analyysi

Kerättyä tietoa ja mittaustuloksia on runsaasti, joten on korkea aika analysoida tuloksia. Luvussa päämuuntajan tutkimukset (4) ovat kuvattuna menetelmät, joilla mittaustietoa kerätään jatkuvasti. Menetelmiä käytetään keskenään ristikkäin tarkemman ja todenmukaisemman tilannekuvan hahmottamiseksi. Kokeiden vaihtelevista luonteista riippuen käytetään eri mittauksia, jotta kokeiden kriittiset suureet tulevat tarkkailluiksi. Esimerkiksi muuntajan käyttölämpötilan alentamisen vaikutusta kaasujen kehitykseen mitattaessa, otetaan tiheämmin öljynäytteitä seuraten kuormitusastetta ja jäähdytysjärjestelmän tilaa. Yhden öljynäytteen analysointi maksaa noin 250 €, joten on myös optimoitava resurssien ja informaation painoarvon suhteen.

### 5.1 Käyttölämpötilan alentamisen vaikutus kaasun kehitykseen

Päämuuntajan radiaattorin tuuletinta käytetään huippuöljyn lämpötilan funktiona. Esimerkiksi Pasilan sähköasemalla on yksi radiaattori muuntajaa kohden, jonka tuuletin on joko päällä täydellä 1,3 kW:n teholla tai kokonaan pois päältä. Kampin asemalla on kaksi radiaattoria ja tuuletinta muuntajaa kohden, tuulettimissa on kaksi eri nopeusvaihtoehtoa, jotka on säädetty käynnistymään portaittain huippuöljyn lämpötilan kasvaessa 45 – 65°C:n välillä. Kesä-arkipäivänä Pasilan sähköasemalla tuulettimet käyvät päällä keskimäärin kerran vuorokaudessa, huippuöljyn termostaatin ollessa säädettyinä arvoon 53°C. Muuntaja M2 on yleensä kuormitettuna muutamalla prosentilla enemmän kuin muuntaja M1. Seuraavassa esimerkki Muuntajan M1 jäähdytyksestä.

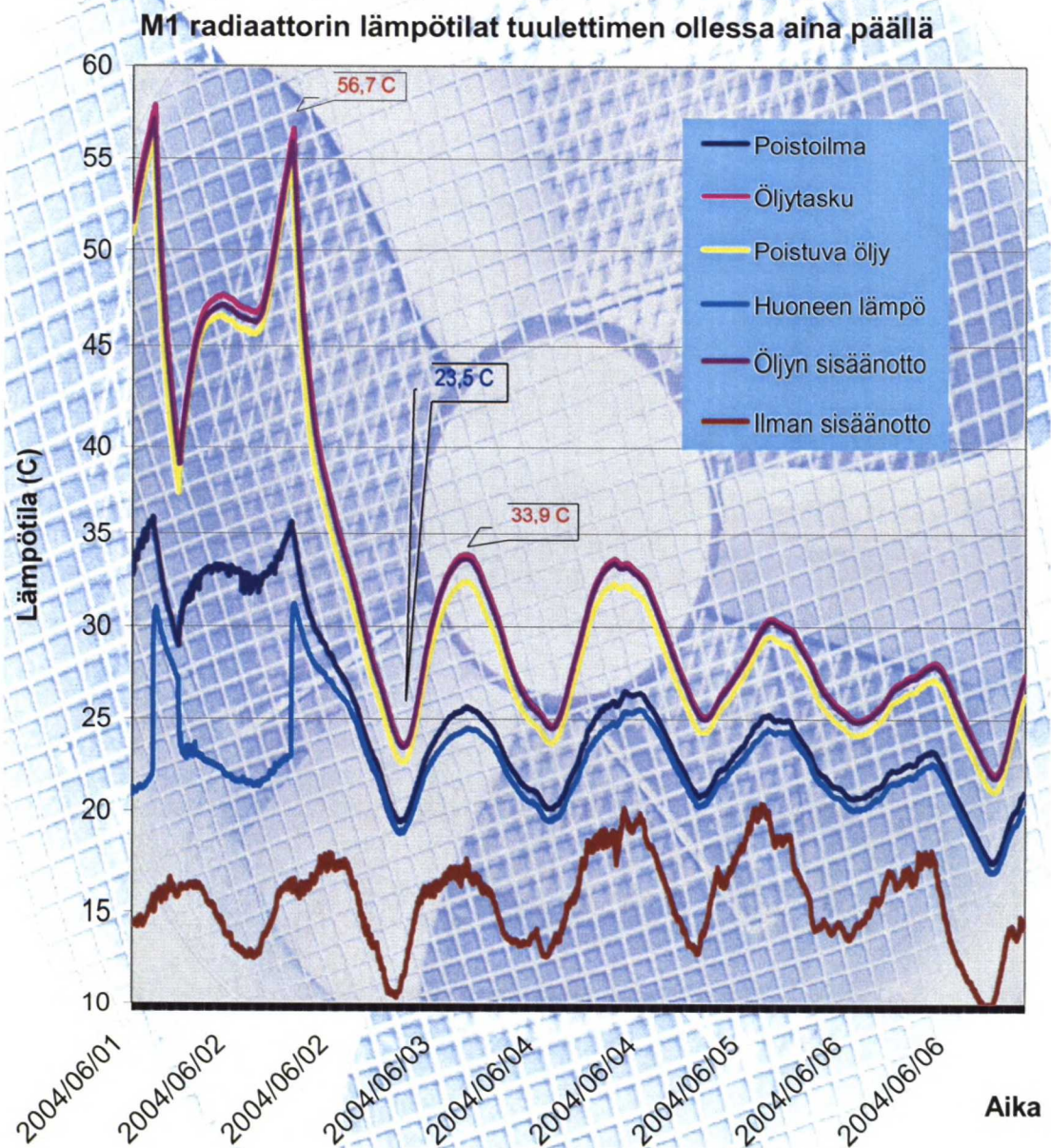


Kuva 46 Paikallisen mittausjärjestelmän mittaus tietoa radiaattorihuoneesta M1.

Kuvassa 46 on näkyvissä jäähdytysjärjestelmän M1 radiaattorin mittaukselliset tulokset kolmen päivän ajalta. Radiaattorin tuuletin on käynnistynyt kaksi kertaa huippuöljyn lämpötilan noustessa yli  $57^{\circ}\text{C}$ . Tuulettimen käynnistyminen näkyy jyrkkänä öljyn lämpötilan alenemisena. Radiaattorin (öljytaskun) lähtölämpötila tuulettimen käynnistyessä on  $57,5^{\circ}\text{C}$ . Muuntajan kannen huippuöljyn lämpötila-anturi mittaa kymmenesosa-asteen pienemmän lämpötilan kuin radiaattorin öljytasku. Edellisellä termostaatin arvolla muuntajan käyntilämpötilan keskiarvo on noin  $50^{\circ}\text{C}$ . Kun tuuletin ei ole päällä öljy jäähtyy radiaattorissa keskimäärin  $0,5^{\circ}\text{C}$ , eli radiaattori jäähdyttää noin 21 kW teholla (Kaava 7).



Kun radiaattorin tuulettimet laitetaan käsiohjauksella päälle yhtäjaksoisesti, putoavat päämuuntajan käyntilämpötilat kesällä noin  $20^{\circ}\text{C}$ . Tuulettimet laitettiin käsikäytölle 3.6. puolenpäivän aikaan, jolloin lämpötilat molemmille muuntajilla laskivat seuraavasti:

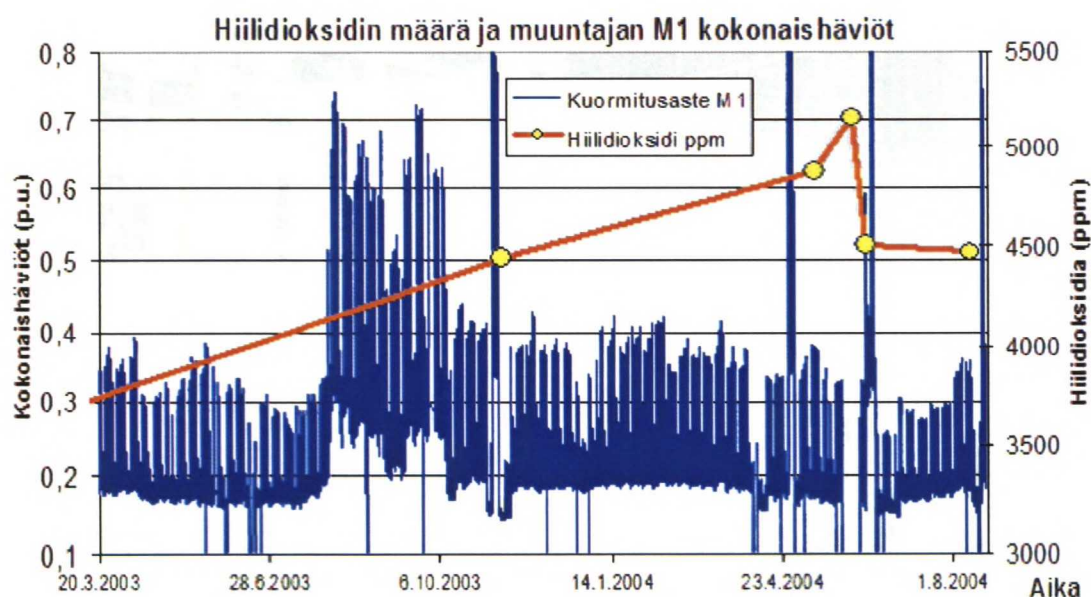


Kuva 47 Mittaustuloksia radiaattorin tuulettimen ollessa kokoaikaisesti päällä.

Kun radiaattorin tuuletin laitetaan päälle kello 12, lämpötila putoaa seuraavan 15 tunnin aikana noin  $30^{\circ}\text{C}$ . Seuraavan päivän valjetessa muuntajan M1 kuormitusaste nousee arvoon 55 %, jolloin jäähdytysöljyn lämpötila öljytankusta mitattuna on korkeimmillaan  $33,9^{\circ}\text{C}$  ja jäähdytysilma lämpenee radiaattorissa noin  $8^{\circ}\text{C}$ . Tuuletin

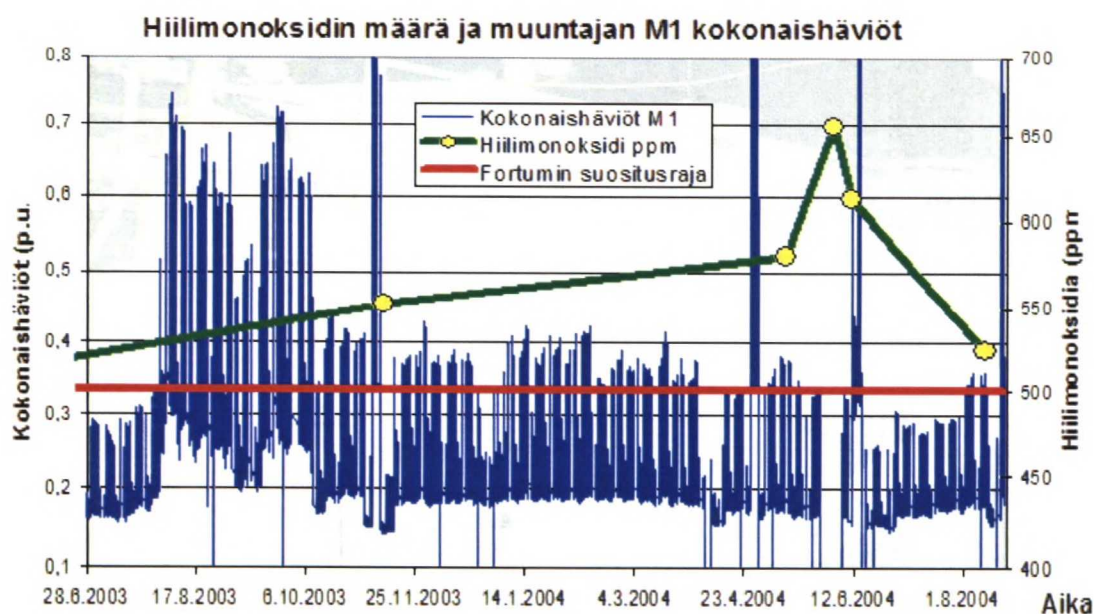
puhaltaa ilmaa radiaattorin läpi valmistajan mukaan  $5,5 \frac{m^3}{s}$ . Jäähdytysteho tuulettimien käynnistyttyä on 137,6 kW (Kaava 7). Ilman ja muuntajaöljyn lämpötilaeron pienentyessä jäähdytysteho laskee myös lineaarisesti.

Molemmilta päämuuntajilta otettiin öljynäytteet ennen kuin jäähdytysjärjestelmän asetuksia muutettiin 3.6.2004. Reilun viikon jälkeen 11.6. otettiin jälleen näytteet molemmista muuntajista; kaasun kehitys pienentyi viikon aikana. Seurantanäytteet otettiin analysoitavaksi kahden kuukauden jälkeen 11.8. Yleisesti tuloksista voidaan havaita kaasunkehityksen hidastuneen keskiarvoisen lämpötilan laskiessa  $20^{\circ}C$ . Seuraavat viisi kuvaajaa 48-52 ovat osa tämän tutkimuksen olennaisimpia löytöjä.



Kuva 48 Hiilidioksidin kehittyminen ja muuntajan M1 häviölämpöteho.



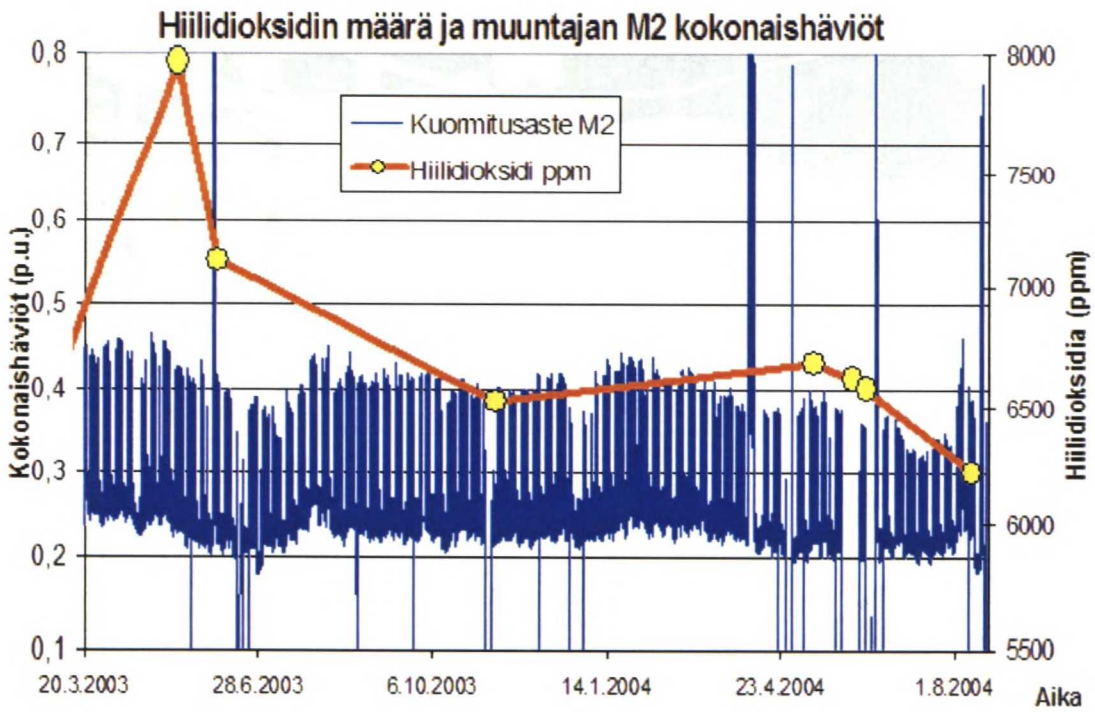


*Kuva 49 Hiilimonoksidin kehittyminen ja muuntajan M1 häviölämpöteho.*

Keskiarvoista lämpötilaa laskemalla paperieristeen hajoaminen hidastuu ja muuntajan elinikä sen suhteen paranee. Tietenkään käyntilämpötilan alentaminen ei korjaa fyysisiä vikoja esimerkiksi käämin rakenteissa tai liitoksissa, mutta nämäkin viat ovat helpommin huomattavissa kun käyntilämpötilasta johtuva hiilioksidien kehitys pienenee.

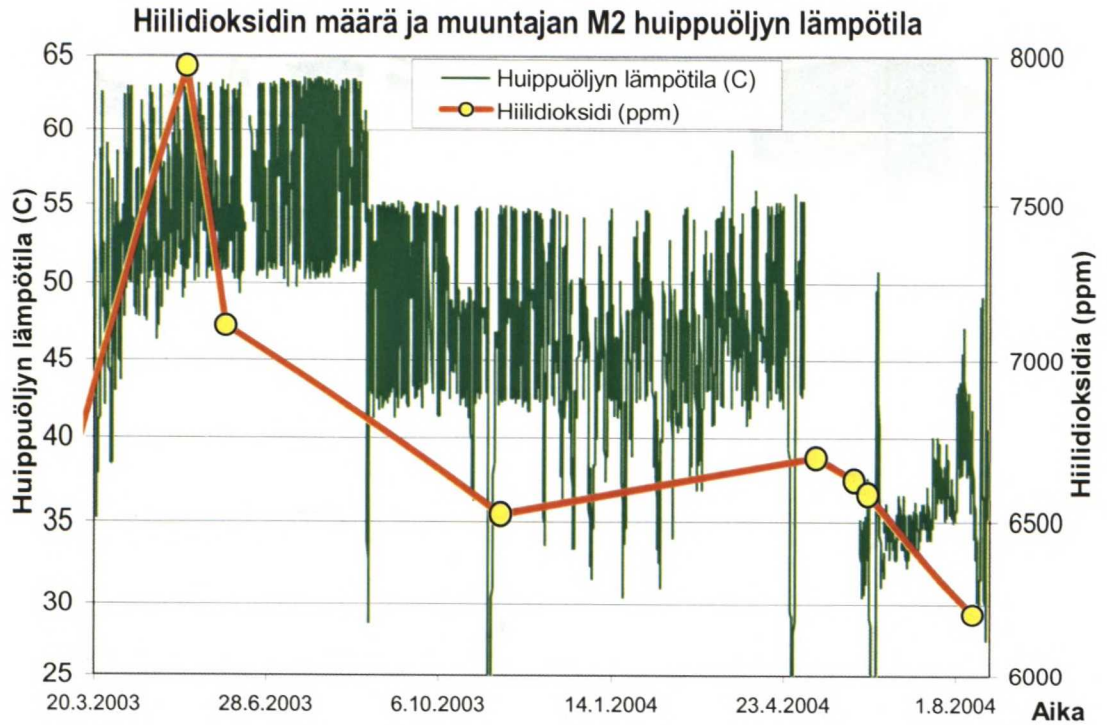
Samanlainen kehityssuunta on havaittavissa myös toisella päämuuntajalla; hiilioksidien kehitys pieneni keskiarvoista käyttölämpötilaa laskemalla.





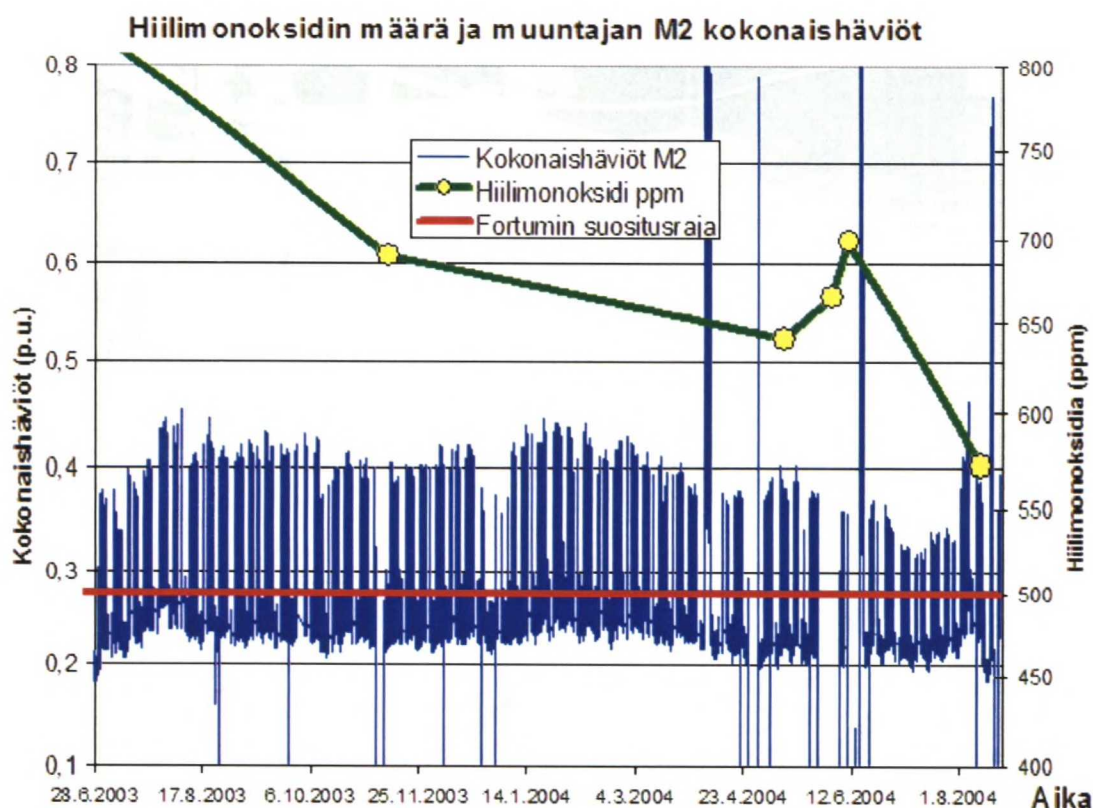
*Kuva 50 Hiilidioksidin kehittyminen ja kokonaishäviöt muuntajalla M2.*

Lämpötilan päivittäinen vaihtelu vaikuttaa myös käyttöikään. Tämän huomioiminen on tärkeää suunnitellessa sähköasemaa ja muuntajien hankintaa. Oikealla säätötekniikalla ja jäähdytysjärjestelmän käytöllä vaikutetaan olennaisesti muuntajan kuntoon ja luotavuuteen. Yksinkertainen tavoite on pitää käyttölämpötila mahdollisimman tasaisena.



*Kuva 51 Pasilan päämuuntajan M2 hiilidioksidinkonsentraatio ja huippuöljyn lämpötila.*

Seuraavassa kuvassa 52 näkee hiilimonoksidin kehityksen ja kokonaishäviöt muuntajalla M2. Tulokset ovat lähes yhteneviä verrattaessa muuntajaan M1.



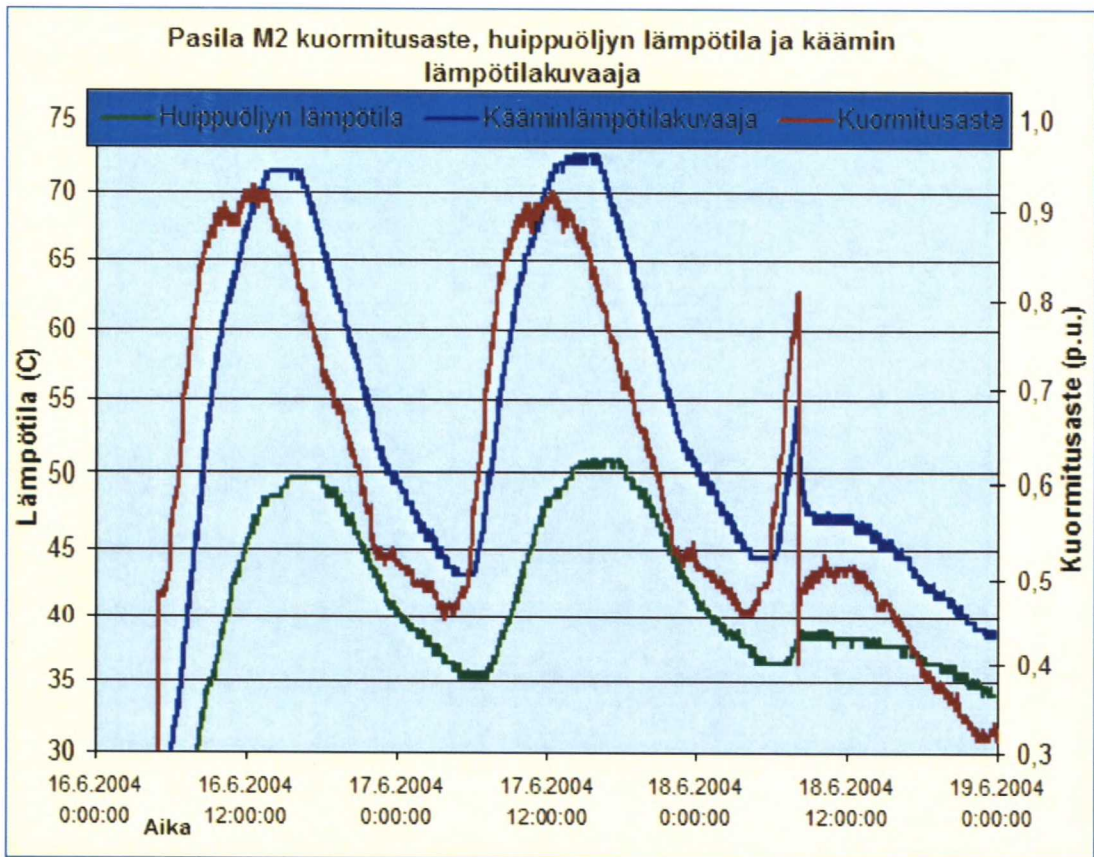
Kuva 52 Hiilimonoksidin kehittyminen ja kokonaishäviöt muuntajalla M2.

Kun radiaattorin M2 tuuletin on otettu jatkuvaan käyttöön, niin viikon kuluttua analysoidaan vielä hieman korkeampi hiilimonoksidi konsentraatio. Seurantanäyte kahden kuukauden kuluttua kuitenkin osoittaa selkeää kehityksen hidastumista.

## 5.2 Kuormituskoe ja muuntajan lämpötila

Molemmille päämuuntajille tehtiin kuormituskokeet, jolloin koko Pasilan sähköaseman kuorma oli kytketty vuoroin yhdelle päämuuntajalle. Kuormitusaste lähestyi nimellisarvoaan molemmilla muuntajilla. Muuntajien käyttöönottokokeissa on määritetty jäähdytysteho muuntajan kuormituksen nimellisarvossa. Tällöin kuormituskokeen tuloksia voi suoraan verrata käyttöönottokokeisiin. Keskiviikkoaamuna kesäkuun 16. kello 5.00 siirrettiin Pasilan sähköaseman kuormitus päämuuntajalta M1 muuntajalle M2 kolmen minuutin liukumalla sähkövalvomon toimesta. Muuntaja M1 jätettiin käyttöönottovalmiuteen. Arkipäivän valjetessa kuormitusaste nousi nolasta noin 90 %:in nimellistehostaan ja huippuöljyn lämpötila nousi  $22^{\circ}\text{C}$ :a likimain  $50^{\circ}\text{C}$ :n. Radiaattorin tuuletin oli kokoajan pakkoikäytöllä, jotta koe olisi yhdenmukainen käyttöönottokokeen kanssa, joka on tehty öljy- ja ilmvirran pakotetulla kierrolla.





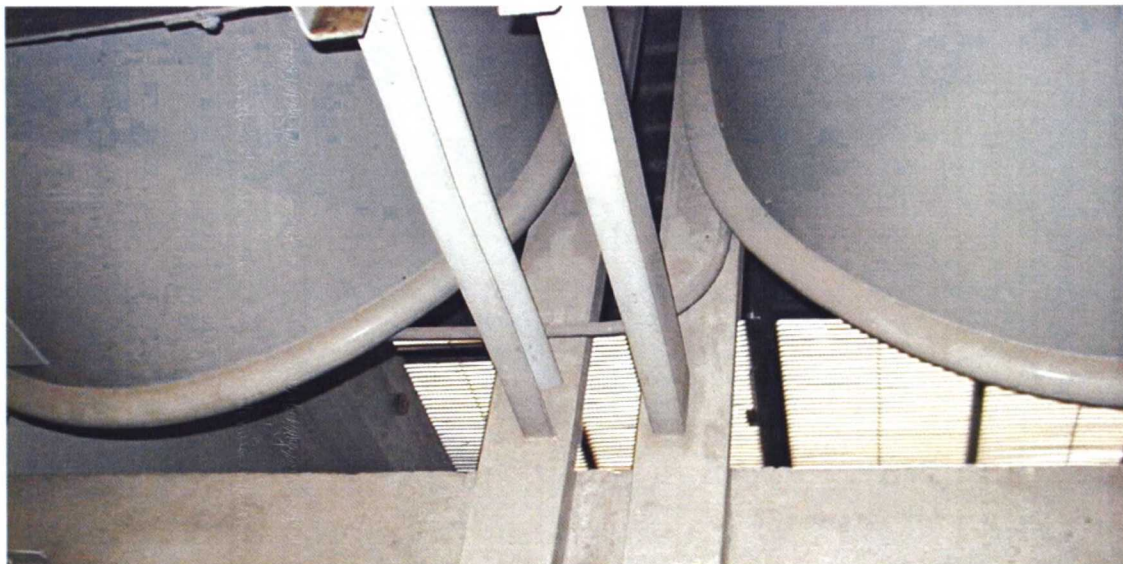
Kuva 53 Kuormituskokeen lämpötilojen mittaustulokset Pasilan muuntajalta M2.

Jäähdytysjärjestelmä toimii niin kuin pitääkin tuulettimien ollessa päällä. Huippuöljyn lämpötila nousee huipussaan noin  $50^{\circ}\text{C}$  kuormituksen ollessa yli 90 % nimellistehostaan. Verrataan kuormituskokeen mittaustuloksia kuvaan 46, jossa on lämpötilojen mittaustuloksia tuulettimien käynnistyslämpötilan ollessa noin  $55^{\circ}\text{C}$ . Kuvassa 46 huippuöljyn lämpötila nousee lähelle  $57^{\circ}\text{C}$  vaikka kuormitus kyseisellä hetkellä on alle puolet muuntajan nimellistehosta. Käytännössä muuntajan paperieristeet vanhenevat puolella nimellisteholla lähes kuin täydellä kuormituksella, koska jäähdytysjärjestelmässä on korkeat käynnistyslämpötila-asetukset.

### 5.3 Jäähdytysjärjestelmän hullunkierto

Kampin jäähdytysjärjestelmä on myös laitettu seurantaan lämpötilojen suhteen. Molemmilla päämuuntajilla on kaksi radiaattoria, jotka molemmat on varustettu omalla tuulettimella. Näille molemmille tuulettimille on omat käynnistyslämpötilat ja niitä voidaan käyttää myös kahdella eri nopeudella. Huomioitavaa onkin, ettei järjestelmässä

tapahdu niin kutsuttua hullunkiertoa, joka tarkoittaa lämpimän ilman kiertoa ympäri radiaattorista toiseen vain toisen tuulettimen pyöriessä. Tämä voidaan korjata käyttämällä molempia tuulettimia vain yhtäaikaaisesti. Kampin sähköaseman kohdalla tämä tarkoittaisi tuulettimien puolinopeutta huippuöljyn lämpötilan kasvaessa  $25^{\circ}C$ . Samais- ta hullunkiertoa tapahtuu esimerkiksi Kruununhaan sähköasemalla, johtuen isoista ilmankulkuväleistä radiaattoreiden sivuilla.



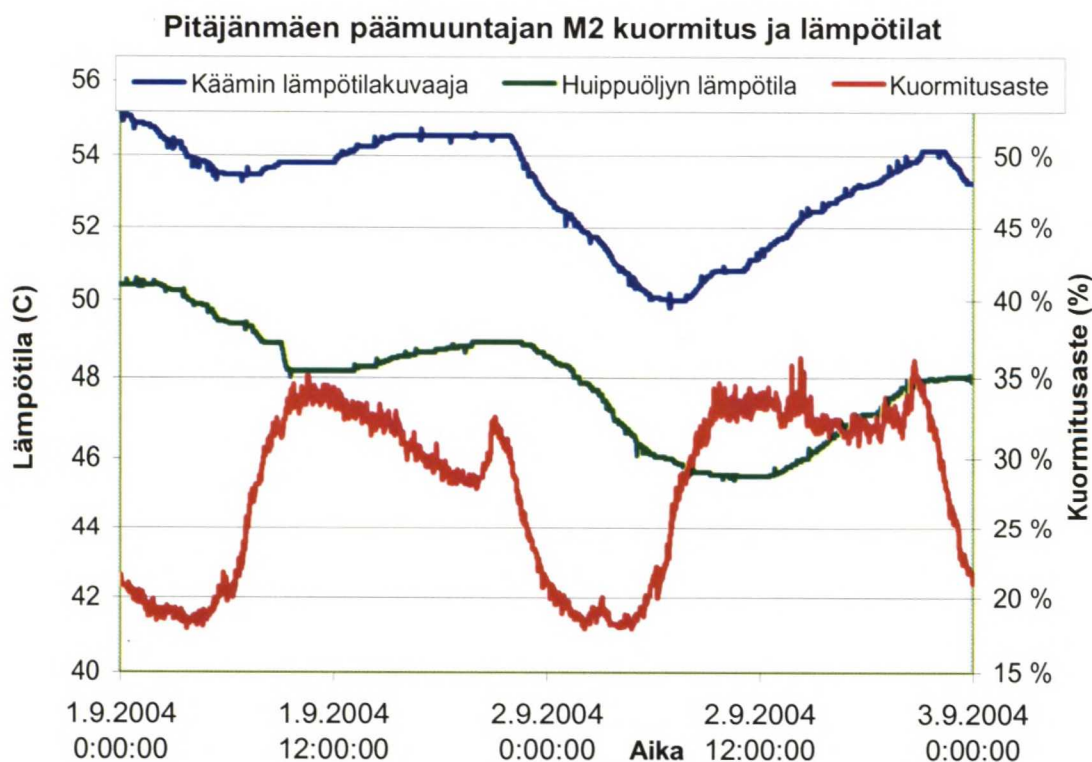
*Kuva 54 Kruununhaan sähköaseman radiaattoreiden vapaa ilmaväli hullunkierrolle.*

On hyödyllistä estää lämpimän ilman kulku radiaattoreiden sivustoista uudelleen radiaattorin läpi asennetuilla ilman kulkuesteellä. Erityisesti tämä on syytä ottaa huomioon uusia sähköasemia suunnitellessa.

#### **5.4 Pitäjänmäen päämuuntajien jäähdytysjärjestelmä**

Pitäjänmäen sähköaseman päämuuntajat M1, M2 ja M3 ovat seurannassa lämpötilojen ja kuormituksen osalta. Kyseiset tiedot tallennetaan minuutin välein scada - järjestelmästä. Kaikki kolme päämuuntajaa ovat ONAF -jäähdytteisiä ja täten yleisenä esimerkkinä asettelurajojen vaikutuksesta käyntilämpötilojen käyttäytymiseen luonnollisella öljy- ja osa-aikaisesti pakotetulla ilmakierto järjestelmällä.





*Kuva 55 Pitäjänmäen sähköaseman ONAF-jäähdytteisen päämuuntajan M2 mittaustietoja kahdelta vuorokaudelta.*

Muuntajan kuormitusasteen vaihdellessa 20-35 % välillä huippuöljyn lämpötila seuraa vaihtelua perässä. Aikavakio on kuitenkin huomattavasti suurempi kuin pakotetulla öljykierrolla toteutetussa järjestelmässä. Luonnollinen öljy- ja ilmakierto on jäähdytysmenetelmä Pitäjänmäen muuntajilla kunnes huippuöljyn lämpötila ylittää käynnistysarvon ja tuulettimet pyörähtävät käyntiin. Asetteluarvoja on laskettu viimeaikoina alaspäin suositusarvosta, joka oli  $80^{\circ}\text{C}$ . Pitäjänmäen muuntajien lämpötiloja seurataan käytönvalvontajärjestelmästä lämpötilariippuvia asetteluarvoja optimoidessa. Väliajoin tehdään kaasuanalyyskejä, jotta voidaan tarkemmin havaita lämpötilamuutosten vaikutukset. Oletusarvoisesti lähdetään liikkeelle luvussa kahdeksan esitetyistä asetteluarvoista.



## 6 Jäähdytysjärjestelmän kunnossapito ja seuranta

Radiaattorit kaipaavat säännöllistä huoltoa eteenkin keskustassa, jossa likaantuminen on nopeampaa. Seuraavassa kuvassa on nähtävissä tarve säännölliseen puhdistukseen. Kuva on otettu Töölön sähköaseman radiaattoreista, jotka ovat todella likaisia.



*Kuva 56 Töölön sähköaseman radiaattorihuone keväällä 2004.*

Tällainen kerrostuma heikentää olennaisesti koko jäähdytysjärjestelmän toimintaa. Koska radiaattoreita on kaksi yhtä muuntajaa kohti, niin lämpötilat ovat pysyneet kohetuullisina. Tämä kuitenkin vaatii toimenpiteitä ja niistä suositeltavin on radiaattorihuoneiden imurointi ja painepesu vedellä, jossa on öljyä liuottavaa pesunestettä.

### 6.1 Radiaattorin tuulettimen käyttöikä

Pasilan muuntajien radiaattorien tuulettimen käyttötunneiksi on ilmoitettu 40000 tuntia 25°C lämpötilassa. Tämä tarkoittaa alle viiden vuoden yhtämittaista käyttöä. Tuulettimia on huollettava perushuollon yhteydessä aina joka toinen vuosi. Erityisesti muunta-

jia joita jäähdyttää vain yksi tuuletin on hyvä seurata tarkemmin, ettei tuulettimen rikkoutuminen yllättäisi.

## 6.2 Jäähdytysjärjestelmän huoltaminen

Yksinkertainen jäähdytysjärjestelmän huolto on imuroida ja pestä radiaattorihuone aina joka toinen vuosi tapahtuvan huollon yhteydessä.



*Kuva 57 Pasilan muuntajan M1 radiaattoreiden painepesu.*

Radiaattoreita pestessä ei pidä seisoa radiaattoreiden levyjen päällä kuten kuvassa 57, sillä pitkällä aikavälillä tämä voi vaurioittaa ohuita radiaattorilevyjä. Imurointi ja pesu suoritettiin viikolla 34. Luonnollisesti ensin imuroidaan radiaattorihuoneen ylä- ja alapuoli, jonka jälkeen radiaattori voidaan pestä painepesurilla. Tuulettimen moottorin suojaus tulee ottaa huomioon; on olemassa vanhempia malleja, joita pitää suojata vedeltä esimerkiksi muovipeitteellä.



7 Jäähdytysjärjestelmien taloudellinen vertailu

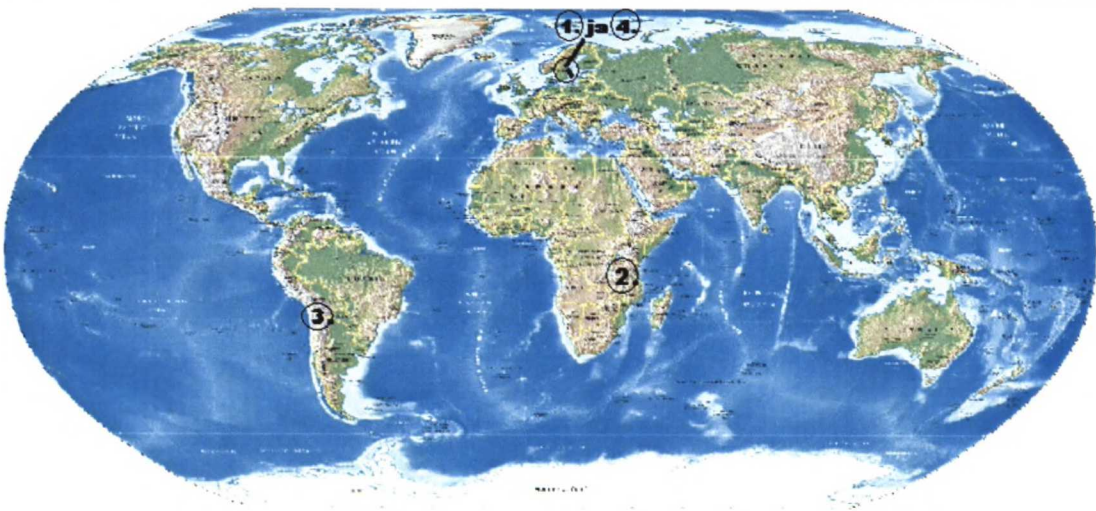
Jäähdytysjärjestelmien valintaan vaikuttaa olennaisesti taloudellinen puoli. Tarkastelu täytyy tehdä tapauskohtaisesti huomioiden asennuspaikka, ilmasto ja laitteiston tilantarve sekä muuntajahäviöt. Seuraavaksi tarkastellaan eri järjestelmien laitteistokustannuksia. Lopuksi verrataan alustavia jäähdytysjärjestelmän kustannuksia suunnitteilla olevalle maanalaiselle sähköasemalle kahden potentiaalisimman vaihtoehdon osalta.

7.1 Laitteistokustannukset

Mallivertailu on tehty neljässä aivan erilaisessa ympäristössä, vertailun kohteena ovat OFWF, OFAF ja ONAF – jäähdytysjärjestelmät ja laitteistokustannukset.

Taulukko 18 Neljän tehomuuntajan häviöt ja keskiarvoiset lämpötilat eri jäähdytysjärjestelmillä.

Yksikön sijainti	Kuormitus häviöt (kW)	Tyhjäkäynti	Yhteensä	Öljyn keskiarvoinen lämpötila (°C) eri jäähdytysmenetelmillä		
				OFWF	OFAF	ONAF
1. Ruotsi	91	15	106	36,5	24,2	31,9
2. Afrikka	343,4	30,9	374,3	27,8	25,1	28,5
3. Chile	787,9	68,3	856,2	30,4	34,8	31,7
4. Jyllanti	1038	137	1175	30,7	29,2	29,1



Kuva 58 Vertailun tehomuuntajien sijainnit 1-4. /20/



Taulukko 19 Laitteiston hinnat muuntajien OFWF -jäähdytysjärjestelmille.

Öljy/vesi jäähdytin tyyppiä Alfa-Laval				Hinta (€)		
Sijainti	Jäähdyttimiä	Tyyppi	Pumppuja	Jäähdytin	Pumppu	Yhteensä
1.	1	M6-MDFM-28	1	2400	1300	<b>3700</b>
2.	1	M10-BDFG	1	10500	1300	<b>11800</b>
3.	1	M10-BDFM	1	12500	1300	<b>13800</b>
4.	2	M10-BDFG	2	14800	1300	<b>32000</b>

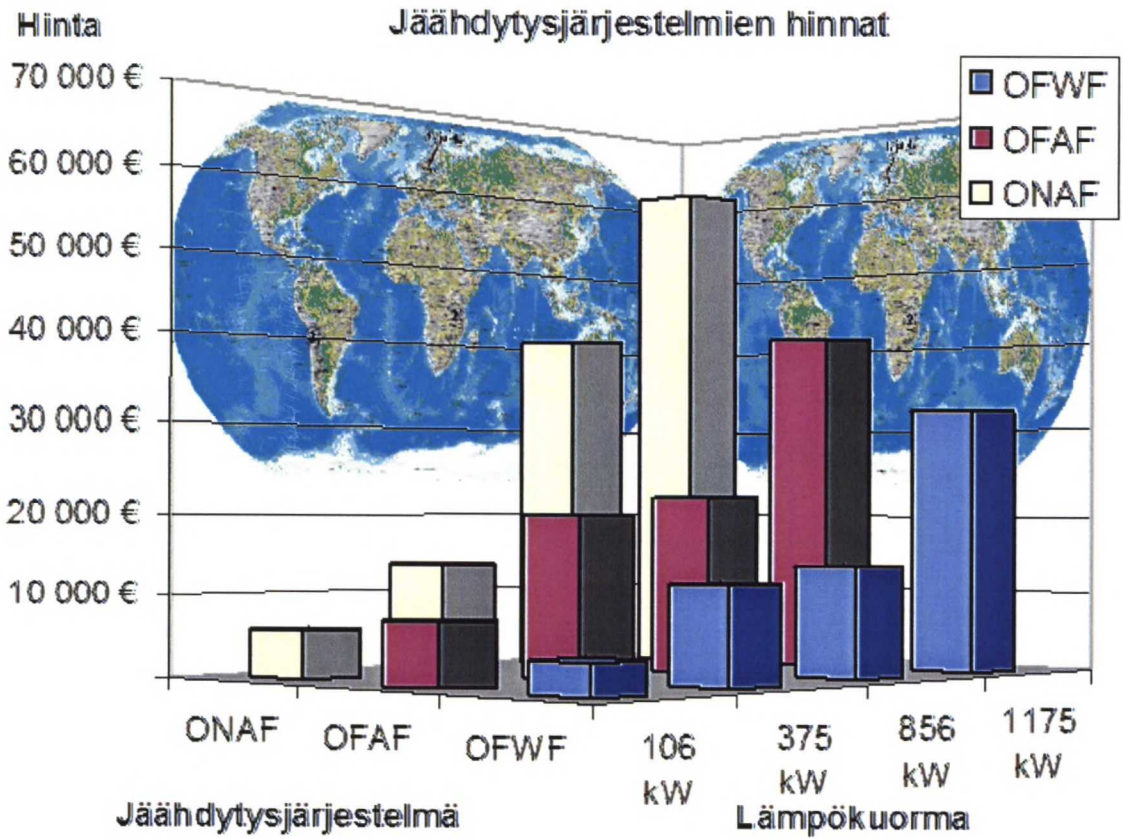
Taulukko 20 Laitteiston hinnat muuntajien OFAF -jäähdytysjärjestelmille.

Öljy/ilma erillisjäähdytys OFAF				Hinta		
Sijainti	Jäähdyttimiä	Pumppuja	Nopeus (rpm)	Jäähdytin	Pumppu	Yhteensä
1.	1	1	450	6150	1300	<b>7440</b>
2.	3	1	575	6150	1300	<b>20000</b>
3.	3	1	970	6900	1300	<b>22000</b>
4.	5	5	970	6900	1300	<b>41000</b>

Taulukko 21 Laitteiston hinnat muuntajien ONAF -jäähdytysjärjestelmille.

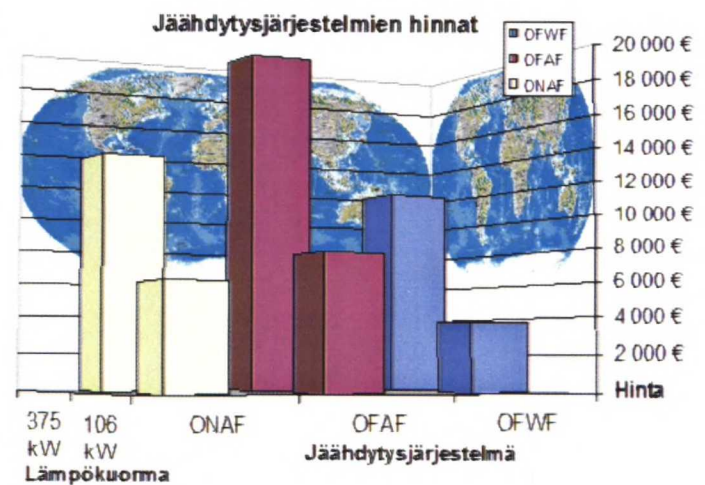
Radiaattori FA 125 – tuulettimilla				Hinta		
Sijainti	Radiaattoreita	Tuulettimia	Nopeus (rpm)	Radiaattori	Tuuletin	Yhteensä
1.	4	1	235	974	1816	<b>5700</b>
2.	11	2	565	1138	1532	<b>13600</b>
3.	24	4	410	1379	1816	<b>40400</b>
4.	40	6	470	1291	1532	<b>60800</b>

Jokainen jäähdytysjärjestelmä suunniteltiin toimivaksi eri järjestelmillä, edullisimmaksi laitteiston hankintojen kohdalta osoittautui öljy/vesi-jäähdytys. Tilakustannuksia ei ole tässä tarkastelussa huomioitu: esimerkiksi maanalaisien sähköasemien rakentamisessa tulee ilmastointikanavien suhteen merkittävä menoerä valittaessa ilmakierto-järjestelmä.



Kuva 59 Jäähdytyslaitteiston hinnat kolmella eri järjestelmällä neljälle tehomuuntajalle.

Kaikissa tapauksissa öljy-vesi jäähdytysjärjestelmä on laitteiston hinnan kannalta edullisin vaihtoehto, kun ei huomioida rakennuskustannuksia, jotka muuttavat tilannetta täysin. Pienemmillä muuntajilla ONAF -jäähdytysjärjestelmä on hieman edullisempi OFAF -järjestelmää, mutta muuntajahäviöiden kasvaessa tulee jälkimmäinen edullisemmaksi. Helsingin Energian päämuuntajien nimelliset muuntajahäviöt ovat korkeintaan 200 kW luokassa: lähempi tarkastelu edellisen tutkimuksen kahden pienimmän muuntajan jäähdytysjärjestelmän kustannuksista on tarpeellinen.





Taulukko 22 Jäähdytyslaitteiden hinnat seuraaviin jäähdytystarpeisiin.

Häviöt	Hinnat (€)		
	OFWF	OFAF	ONAF
106 kW	3700	7440	5700
375 kW	11800	20000	13600
856 kW	13800	22000	40400
1175 kW	32000	41000	60800

Taulukko 23 Jäähdytysjärjestelmän käyttöhäviöt nykyisillä sähköasemilla.

Muuntaja	Jäähdytysjärjestelmä	Teho (kW)
Tapanila M1	OFAF	6,5
Pasila M1	OFAF	8,0
Kannelmäki M2	ONAF	5,6
Myllypuro M1	ONAF	2,8
Vuosaari M1	ONAF	2,0
Viikinmäki M2	ONAF	3,5
Viikinmäki M3	ONAF	1,2
Pitäjänmäki M3	ONAF	1,2

OFAF -järjestelmän häviöt ovat suurempia öljypumppujen vaatiman tehon vuoksi. Nykyisiä öljynpumppaustehoja voidaan kyllä pienentää muutamia kymmeniä prosentteja. Helsingin Energian ja ABB:n yhteistyönä tehty tutkimus öljykiertonopeuden vaikutuksista käämin kuumimpaan pisteeseen osoittaa, että vasta virtausnopeuden pienentyessä neljäsosaansa käämin kuumimman pisteen lämpötila nousi  $5,6^{\circ}\text{C}$  verrattaessa täyteen öljyn kiertoon. Tutkimuskohteen normaali öljynvirtausnopeus oli 1060 litraa minuutissa. Riittävä virtausnopeus tässä kokoluokassa on noin 700 litraa minuutissa. /25/ /26/

ONAF -jäähdytysjärjestelmän käyttöhäviöt ovat moninkertaisesti pienemmät ottaen huomioon tuulettimien harvempi käyttö verrattaessa OFAF -järjestelmään. Kummassakaan tapauksessa häviöt eivät kuitenkaan ole merkittävät, joten OFAF -muuntajan suurempi kuormitettavuus ja vähäisemmät ympäristön meluhaitat ovat tärkeämpiä etuja.



## 7.2 Maanalainen jäähdytysjärjestelmä

Esisuunnitteluvaiheessa olevalle maanalaiselle sähköasemalle pohditaan vesijäähdytysjärjestelmää, sillä asema tulee olemaan noin 20 metriä maanpinnan alapuolella. Tarkoituksena on vertailla karkeasti vesi- ja ilmajäähdytteisen järjestelmän kokonaiskustannuksia.

### 7.2.1 Rakennuskustannukset OFAF -järjestelmälle

Suurimmat kustannukset ovat rakennuskustannuksia: ilmanvaihtokanava maanpinnalle ja rakennuksen läpi katolle maksaa huomattavasti enemmän kuin itse järjestelmälaitteet.

*Taulukko 24 Pystykuilujen rakennuskustannukset 110 kV:n kaapeleiden kalliolouhinnalle.*

Pystykuilujen kustannukset	Laskentahinnat	
Kalliotutkimus ja suunnittelu	10 000	EUR/kpl
Pystykuilun louhinta	1 700	EUR/m
Kuilun rakenteet tms.	1 500	EUR/m
Kaivo kuilun yläpäässä	10 000	EUR/kpl
Suojaus alapäässä	5 000	EUR/kpl
Kaapeleiden ripustus, kiinnitys	100	EUR/m

Taulukon perusteella 20 metrin ilmakehän rakennuskustannukseksi sähköasemalta maanpinnalle tulee noin 90 000 €. Lisäksi ilmanvaihtokanava on rakennettava jonkin olemassa olevan rakennuksen läpi katolle saakka.

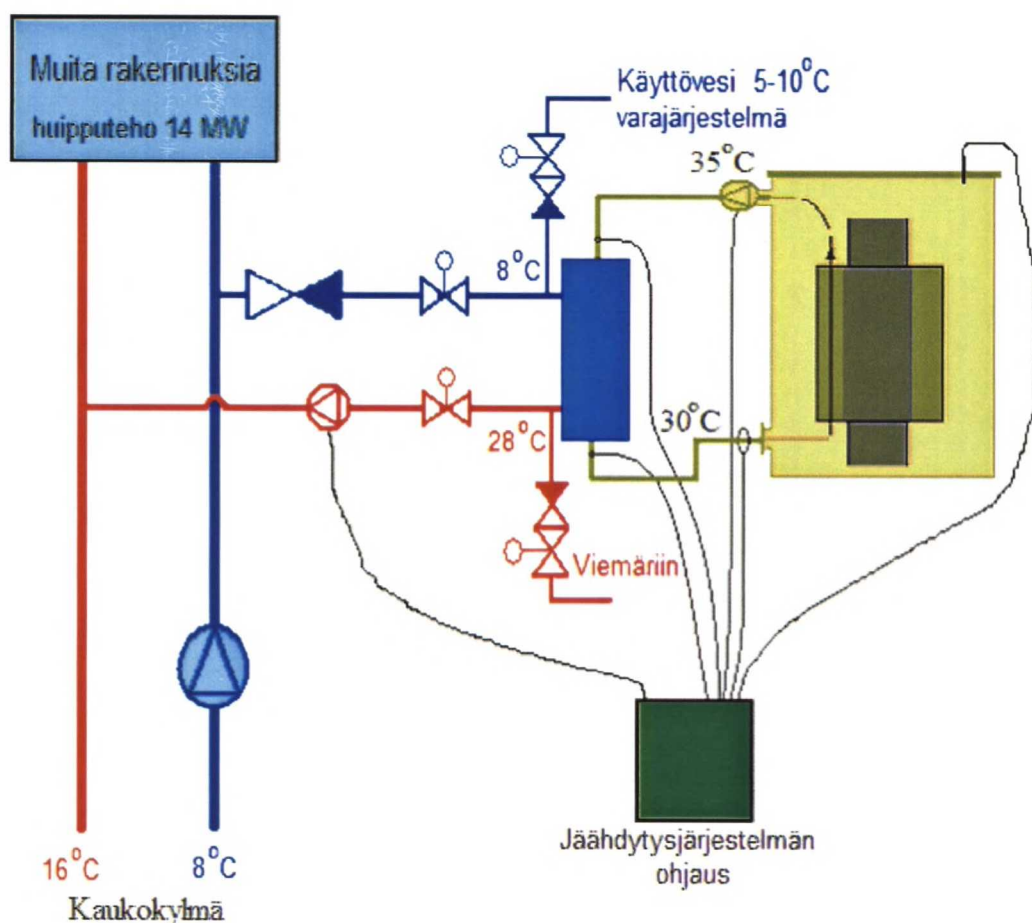
OFAF -jäähdytysjärjestelmän laitteiden kustannukset ovat noin 30 000 €. Käyttöhäviöt tuulettimelle ja öljypumpulle ovat hieman suuremmat kuin yleensä, johtuen pitkästä tuuletuskierrosta. Häviöt ovat yhteensä noin 10 kW ja niiden kustannusarvio lasketaan päämuuntajien hankintaohjelman tyhjäkäyntihäviöiden arvostuksesta.

Taulukko 25 OFAF-järjestelmän kustannukset maanlaiselle sähköasemalle.

Pystykuilu (20m) * 2	200 000	€/sähköasema
OFAF-laitteisto * 2	60 000	€/sähköasema
Häviöt 10 kW * 2400 €/kW * 2 * elinikä	48 000 €	€/sähköasema
Jäähdytyskuilu rakennuksessa	100 000 €	€/sähköasema
<b>Kertakustannukset yhteensä</b>	<b>404 000 €</b>	<b>€/sähköasema</b>
<b>Tuuletuskanava talossa (vuokra/vuosi)</b>	<b>57 600 €</b>	<b>€/vuosi</b>

### 7.2.2 OFWF-jäähdytysjärjestelmän kustannukset

Jäähdytysjärjestelmän kustannuksia nostavat varmuustekijät; yksi vika ei saa lamauttaa muuntajaa niin tarvitaan rinnakkainen varajärjestelmä. Helsingin Energian kaukokylmäverkko jakaa jäähdytystehoa, johon sähköasema voidaan liittää. Arviot ovat tehty seuraavanlaiselle vesi-öljy jäähdytysjärjestelmälle (Kuva 60).



Kuva 60 Yksinkertainen periaatekaavio kaukokylmäjäähdytykselle.

Jäähdytysvesi pumpataan kaukokylmäjärjestelmästä korkeintaan  $8^{\circ}C$  lämpötilassa vuotovarmennetun vesi-öljy lämmönvaihtimen läpi kaukokylmäverkon paluuputkeen veden lämmitessä  $20^{\circ}C$ . Muuntajaöljyä pumpataan  $35^{\circ}C$  lämpötilassa lämmönvaihtimelle, jossa se jäähtyy noin  $5^{\circ}C$ . Muuntajan huippuöljyn lämpötilaa seuraa säätöjärjestelmä, joka ohjaa sekä vesi- että öljypumppujen toimintaa, pitäen käyttölämpötilan tasaisesti  $35^{\circ}C$  lähettyvillä. Jos kaukokylmää ei ole saatavilla jäähdytysjärjestelmään, käytetään vesijohtoverkon vettä.

Jäähdytyslaitteiston ohjausjärjestelmään tulee öljynvirtausnopeus, öljyn lämpötilat ennen ja jälkeen lämmönvaihtimen, huippuöljyn lämpötila sekä käämin lämpötilakuvaaja sekä muuntajan toisiovirta. Näiden tietojen perusteella muuntajasta saadaan poistettua lämpöhäviöt likimain sitä myöden kun niitä kehitty kuormitusvirran funktiona.

Jäähdytysjärjestelmän laitekustannukset yhdellä vuotovarmistetulla lämmönvaihtimella ja pumpuilla sekä tarvittavalla säätötekniikalla ovat noin 25 000 – 30 000 €. Kaukokylmäverkon vesiputket täytyy vetää joko 10 metriä yläpuolelta tai 20 metriä alapuolelta, riippuen rakentamisen aikatauluista. Periaatteessa kaukokylmäjäähdytyksen hinta koostuu kolmesta osatekijästä: sopimus-, vuosi ja energiamaksusta.

$$Sopimusmaksu = 15000 \text{ €} + P(kW) \cdot 252 \text{ €/kW} + V\left(m^3/h\right) \cdot 422 \text{ €/h/m}^3 \quad (16)$$

$$Vuosimaksu = P(kW) \cdot 27 \text{ €/kW} + V\left(m^3/h\right) \cdot 69 \text{ €/h/m}^3 \quad (17)$$

$$Energiamaksu = 13,5 \text{ €/MWh} \quad (18)$$

$$\text{missä, } \begin{aligned} P(kW) &= \text{Huipputeho kilowateissa} \\ V\left(m^3/h\right) &= \text{Huippuvirtauma} \end{aligned}$$

Sähköaseman maksimihäviöteholle 400 kW sekä  $20^{\circ}C$  lämpenemälle saadaan virtausnopeus kaavalla 8 käyttäen veden ominaislämpökapasiteettia  $4,19 \text{ kWs/kgK}$ . Maksimikuormalla veden virtausnopeus on  $17,2 \text{ m}^3/h$ .



Yleisesti muuntajan vuotuinen lämpöenergia saadaan integroimalla häviöteho ajan funktiona. Esisuunnittelun laskentaesimerkiksi otetaan Pasilan päämuuntajan M1 tuottama lämpöenergia vuonna 2003.

$$\int P_{Kok}(t) dt = \int \left[ \left( \frac{I(t)}{I_N} \right)^2 P_{k_N} + P_{t_N} \right] dt \quad (19)$$

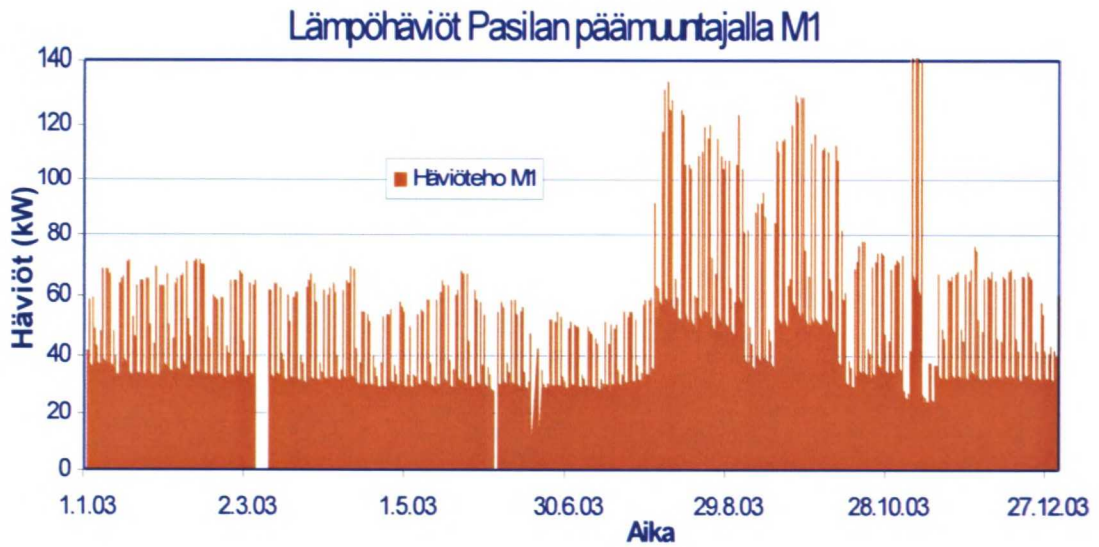
$P_{Kok}(t)$  = Kokonaishäviöteho ajan funktiona

$I_N$  = Nimellisvirta

missä,  $I(t)$  = Kuormitusvirta ajan funktiona

$P_{k_N}$  = Kuormitushäviöt nimellisvirralla

$P_{t_N}$  = Tyhjäkäyntihäviöt



Kuva 61 Pasilan päämuuntajan M1 vuonna 2003 tuottama lämpöenergia.

Tehoa integroidessa saadaan Pasilan päämuuntajan M1 häviölämpöenergiaksi 397 MWh, ja muuntajan M2 438 MWh häviöenergiaksi vuonna 2003. Tämän perusteella vuosittaiset jäähdytysenergiakustannukset ovat noin 22 000 €.

Alustavat kustannukset koko jäähdytysjärjestelmälle ovat seuraavat kun sopimus kaukokylmäverkon kanssa on alustavasti 15 vuoden pituinen.

Taulukko 26 Kaukojäähdytysjärjestelmän kustannukset maanalaiselle sähköasemalle.

OFWF -järjestelmä Kluuvin sähköasemalle	Laskentahinnat	
Laitteisto	60 000	€/sähköasema
Sopimusmaksu	123 000	€
<b>Aloituskustannukset yhteensä</b>	<b>= 183 000</b>	<b>€/sähköasema</b>
Vuosimaksu	12 000	€/vuosi
Vuosittainen energiamaksu	10 000	€/sähköasema
<b>Vuosittaiset kustannukset</b>	<b>= 22 000</b>	<b>€/vuosi</b>

Varajärjestelmän käyttö huipputeholla maksaa noin 52 euroa käyttötuntia kohti veden hinnalla 3 €/m<sup>3</sup>. Kaukokylmäverkon asiantuntijan Antti Saviniemen mukaan laskennallisesti on syytä varautua vuorokauden kestävään jäähdytysenergian jakelukeskeytykseen kerran viidessä vuodessa. Tällöin käyttövedelle sähköaseman maksimihäviöillä tulisi kustannukseksi 1250 euroa vuorokaudessa.

Alustavan arvion mukaan ilmajäähdytysjärjestelmä tulee kertakustannuksien osalta noin 220 000 euroa kalliimmaksi. Vuosittaiset kustannukset OFAF -järjestelmän osalta ovat vuokramaksut rakennuksen läpi, katutasolta katolle, kulkevasta ilmajäähdytyskuilusta sekä tuulettimien häviöistä, jälkimmäisten merkitessä kuitenkin suhteellisen vähän.

Vesijäähdytysjärjestelmän kertakustannukset maanalaiselle sähköasemalle ovat noin 180 000 euroa, jotka pääosin koostuvat HelenJäähdytyksen kertaluontoisesta sopimusmaksusta. Sopimusmaksuun sisältyy rakennuskustannukset, jotka tulevat jäähdytysveden kulkureitin rakentamisesta toimitusrajalle. Vuosittaiset kustannukset ovat energiamaksuja käytetystä jäähdytystehosta. Pasilan muuntajien esimerkkiä lainaten vuosittaiset energiamaksut, kun sähköasema toimii keskimäärin puolella koko nimellistehostaan, ovat alle 22 000 euroa. Joten vuosittaiset kustannukset ovat vesijärjestelmän osalta noin 34 000 euroa pienemmät.

## 8 Yhteenveto ja johtopäätökset

Jäähdytysjärjestelmän toiminta vaikuttaa muuntajan kuntoon. OFAF -jäähdytteisten muuntajien tuulettimien käynnistyslämpötilat ovat olleet tarpeettoman korkeita. Kun kyseistä järjestelmää käytetään ilman tuulettimia, muuntajien ohjeellinen kuormitettavuus on korkeintaan noin 30 % luokkaa. Yleisesti Helsingin Energian päämuuntajien kuormitusaste on noin puolet nimellistehostaan, joten järjestelmä kerää muuntajahäviöistä syntyvää lämpöenergiaa sisälleen poistamatta sitä ajoissa. Tästä johtuen muuntajan lämpötila nousee jyrkästi kuormituksen ylittäessä noin 30 % nimellistehon. Tuuletin kyllä käynnistyy myöhemmin, mutta lämpötila muuntajan käämeissä on noussut tällöin tarpeettoman korkeaksi. OFAF -järjestelmän muuntajatankin öljy jäähdyttää käämeissä virtaavaa öljyä. Kun huippuöljyn lämpötila on noussut esimerkiksi arvoon  $57^{\circ}\text{C}$ , niin lämpötila käämien sisällä voi olla  $70^{\circ}\text{C}$  tienoilla. Lämpötila sinänsä ei ole dramaattinen, mutta kun huomioidaan sen kehittyvän jo alle puolella kuormalla, on se liian suuri. Vastaavanlaisia tapauksia löytyy muualtakin pohjoismaista; missä muuntajan käyttöikä on kulutettu ennenaikaisesti liian korkeilla tuulettimien käynnistyslämpötiloilla. Siellä ratkaisuna oli myös alentaa tuulettimien käynnistysarvoja.

### 8.1 Uudet arvot tuulettimien termostaateille

Tutkimuksen perusteella määritetään päämuuntajien puhallinryhmien asettelurajat käynnistyksille, öljyn ja käämikytkimen lämpötilahälytyksille sekä laukaisuille. Näitä asettelurajoja on hyvä käyttää, ellei muuntajakohtaisesti ole erityistä syytä poiketa näistä suositusarvoista. Järjestelmiä säädettäessä on huomioitava epätarkkuus, joka voi vaihdella muutamasta asteesta lähes kymmeneen asteeseen, ja tarkkailtava vaikutuksia.

**ONAF -jäähdytysjärjestelmä**      Öljyn lämpömittari      Käämin lämpötilan kuvaaja:

Puhaltimet, 1. ryhmä	50 °C	55 °C
Puhaltimet, 2. ryhmä	55 °C	65 °C
Hälytys	80 °C	95 °C
Laukaisu	105 °C	135 °C



**OFAF – jäähdytysjärjestelmä: Kaksi radiaattoria muuntajaa kohti**

	Öljyn lämpömittari:	Käämin lämpötilan kuvaaja:
Puhaltimet, 1.Ryhmä, 1/2nopeus	30 °C	35 °C
Puhaltimet, 2.Ryhmä, 1/2nopeus	33 °C	37 °C
Puhaltimet, 1.Ryhmä, 1/1 nopeus	40 °C	45 °C
Puhaltimet, 2.Ryhmä, 1/1 nopeus	37 °C	43 °C
Hälytys	70 °C	90 °C
Laukaisu	100 °C	115 °C

**OFAF – jäähdytysjärjestelmä: Yksi radiaattori muuntajaa kohti**

	Öljyn lämpömittari:	Käämin lämpötilan kuvaaja:
Puhaltimet käynnistetään	35 °C	38 °C
Puhaltimet pysäytetään	27 °C	30 °C
Hälytys	70 °C	90 °C
Laukaisu	100 °C	115 °C

**8.2 Jäähdytysjärjestelmän valinta**

Päämuuntajien hankintaohjelmaan on hyvä lisätä tarkennuksia jäähdytysjärjestelmän suhteen. Tuulettimille ja pumpuille on asennettava säätötekniikkaa poistamaan häviölämpö muuntajasta siten, ettei käyttölämpötila jäähdytysjärjestelmästä johtuen vaihtelisi paljon. Käyttövarmuus on hyvä huomioida siten, ettei yhden tuulettimen rikkoutuminen estä muuntajaa toimimasta. Esimerkiksi, jos Pasilan sähköaseman jompikumpi radiaattoreiden tuulettimista vaurioituu tällä hetkellä, se tarkoittaa, että päämuuntajia voidaan korkeintaan kuormittaa muutaman kymmenen prosentin

kuormituksella nimellistehostaan. Toisaalta ei ole tarpeellista vaihtaa jäähdytystapaa erillisjäähdytyksestä luonnolliseen jäähdytykseen. Tärkeää on kuitenkin huomioida erillisjäähdytyksen tuulettimien käytön tarpeellisuus, joka on huomattavasti suurempi kuin luonnollisen jäähdytysjärjestelmän isoilla radiaattoreilla. Erillisjäähdytyksen efektiivinen jäähdytyspinta-ala on suunniteltu toimimaan pakotetulla ilmakierrolla. Vastanottokokeiden aikana on syytä tehdä lämpenemiskoe erillisjäähdytteiselle päämuuntajalle, kun tuulettimet eivät ole käytössä.

Vesijäähdytteinen järjestelmä on varteenotettava vaihtoehto maanalaisissa tiloissa, muuten sen kustannukset ovat suuret verrattuna ilmajäähdytykseen. Helsingin Energian kaukojäähdytysverkko on mahdollinen ratkaisu esisuunnitteluvaiheessa olevalle maanalaiselle sähköasemalle. Saksassa on myös toteutettu muuntajien jäähdytys hyödyntäen vesijohtoverkkoa: veteen siirretään muuntajien lämpöhäviöt asiakkaille menevän käyttöveden lämmitessä muutamia asteita. Tämä on siis mahdollista, mutta ei suositeltavaa Helsingissä, ettei käyttöveden laatu heikkenisi. Kiinteistön lämmintä käyttövettä voi esilämmittää muuntajan häviölämmöllä; tämä kuitenkin monimutkaistaa järjestelmää ja kokemusten perusteella kasvattaa huollon tarvetta /26/. Tarkempaa tietoa aiheesta löytyy Mikko Helingin diplomityöstä: ”Muuntajan häviölämmön hyväksikäyttö”.

### **8.3 Tulevaisuuden jäähdytysjärjestelmä**

Muuntajavalmistajat ovat kehittäneet säätötekniisiä ratkaisuja käyntilämpötilan vakauttamiseen. Nämä tuotteet ovat suhteellisen kalliita asennettavaksi kaikkiin päämuuntajiin. Asennus on kuitenkin kannattava hintojen laskiessa ajan kuluessa. Yksinkertaisemmin voidaan myös rakentaa säätöjärjestelmä ostamatta koko monitorointiyksikköä.

Kuormitusvirran perusteella voidaan laskea tarvittava jäähdytysteho siten, ettei lämpötila vaihtelisi paljoa. Lämpölaajenemisesta johtuva muuntajan hengitys pienenee ja tällöin kosteutta ei keräänny myöskään yhtä nopeasti. Seurannan alle tarvitaan muuntajasta poistuva ja muuntajaan menevän öljyn lämpötila. Säätökäyttö öljypumpuihin ja tuulettimiin mahdollistaisi jäähdytystehon portaattoman säädön. Tämä optimoi huomattavasti päämuuntajan jäähdytystä: jäähdytysteho portaattomasti säädettyinä toisiovirran funktiona vakauttaa muuntajan käyntilämpötilan.

---

## *Lähdeluettelo*

- 1 Vuosikertomus 2003. Helsingin Energia. Helsinki: Art-Print, 2004.
- 2 MX100 User's manual and standart software manual first edition, Yokogawa Electric Corporation, 2003, 72 s + 110 s.
- 3 The J & P Transformer Book, twelfth edition, Martin J. Heathcote, CEng FIEE 1998, reprinted 2003, 940 s.
- 4 Licentiate Thesis: Evaluation of Power System Harmonic Effects on transformers by Asaad A. Elmoudi, Helsinki University of Technology, Mar. 2004, 64 s.
- 5 IEC 354. Loading guide for oil-immersed power transformers. Geneve: International Electrotechnical Comission, 1991. 157 s.
- 6 IEC 599. Mineral oil-impregnated electrical equipment in service – Guide to the interpretation of dissolved and free gases analysis. Geneve: International Electrotechnical Comission, 1999-3. 78 s.
- 7 Helsingin Energian jakeluverkkojen tiedonhallinnan kehittäminen, Olli Markkanen, Diplomityö Teknillinen Korkeakoulu 2001, 87 s.
- 8 Sähkömekaniikka ja sähkökäytöt osa 1 S-17.102 luentomoniste, Jorma Luomi, Jouko Niiranen, Asko Niemenmaa, Teknillinen Korkeakoulu 2003, 178 s.
- 9 Measurement of winding temperature of power transformers and diagnosis of ageing deterioration by detection of CO<sub>2</sub> and CO, K. GOto, H. Tsukioka, E Mori, CIGRÉ 12-102 Japan 1990 10 s.
- 10 Supply of 3 transformers 40 MVA – 138 / 13,8 kV, ABB Walmir Person 5/2003, 5 s.
- 11 Etaani ja asetyleeni molekyyliden kuvat: [www.uku.fi/~tanevala/FKP2/1-8-etaani.htm](http://www.uku.fi/~tanevala/FKP2/1-8-etaani.htm) 23.8.2004.



- 
- 12 Selluloosa-molekyylin kuva 23.8.2004:  
[www.stud.unimuenchen.de/~markus.foerg/formula/cellu1.gif](http://www.stud.unimuenchen.de/~markus.foerg/formula/cellu1.gif)
- 13 Kunnonhallintamenetelmien soveltaminen sähköverkon kunnossapitoon, Jyrki Aukusti Nieminen, Diplomityö Teknillinen Korkeakoulu 2002, 109 s.
- 14 Helsingin Energian sähköasemamuuntajien eristeöljytutkimuksia, Mauri Aroranta, Fortum, 2003. 58 s
- 15 Helsingin Energian 110kV muuntajien kuvaus käytön aikana, Mauri Aroranta, Fortum 2003, 6 s.
- 16 Transformer oil handbook, Nynäs Naphthenics AB, Sweden 2004, 223 s.
- 17 Large Power Transformer, K. Karsai, D. Kerenyi, L Kiss, Elsevier 1987, 615 s.
- 18 Öljy- ja paperieristeanalyysit muuntajan kunnonvalvontatyökaluna, Marjatta Västi, Fortum Power and Heat Oy 1999, 9 s.
- 19 Tarjous maanalaisen sähköaseman jäähdytyksestä kaukokylmällä, Riipinen Marko, Helen Jäähdytys 2004, sähköposti.
- 20 Maailmankartta, <http://fi.wikipedia.org/wiki>, 28.9.2004
- 40 GEA Ecoflex – lämmönvaihtimet, pdf-esite. GEA 2004, 45 s.

## ***Keskustelut***

- 21 Markku Hyvärinen, Tutkimus- ja kehityspäällikkö, Helen Verkko – useita keskusteluja.
- 22 Matti Lehtonen, professori, TKK:n Sähköverkko ja suurjännitetekniikan laboratorio – useita keskusteluja.
- 23 Patjas Oskari, kunnossapito päällikkö, Helen Verkko / käytön valvonta – säännöllisiä tapaamisia vuonna 2004.
- 24 Hinkkanen Mika, käytönvalvonta päällikkö, Helen Verkko / käytön valvonta – säännöllisiä tapaamisia vuonna 2004.
- 25 Nordman Hasse, tekniikan tohtori - Vierailu ABB:n suurmuuntaja tehtaalla 17.8.2004 ja 10.9.2004 Kannelmäen muuntajan vastaanottokokeissa.
- 26 Vanhala Pauli, Suunnittelupäällikkö Helen verkko / alueverkkohankkeet – Jäähdytyksen teoria ja sähköasemien historiaa Helsingin Energiassa, 2004.
- 27 Innala Jussi-Petteri, tiimipäällikkö Helen Service / sähköasemat – aiheena mittausjärjestelmän rakentaminen Pasilan päämuuntajille sekä huollon näkökulma jäähdytysjärjestelmiin, 1-9/2004.
- 28 Dejan Susa, tutkija, Sähköverkot ja suurjännitetekniikka – lukuisia keskusteluja ja suunnittelutapaamisia vuoden 2004 aikana.
- 29 Mika Karhunen, suunnitteluinsinööri Planar Oy – aiheena mittaustekniikka, 7/2004.
- 30 Janne Silvennoinen, mittausjärjestelmien myyjä Kontram Oy – aiheena mittauslaitteisto ja ominaisuudet, 1-5/2004.
- 31 Osmo Siirto, järjestelmäpäällikkö Helen Verkko / verkonjärjestelmät – aiheena käytönvalvontajärjestelmän rakenne ja scada-mittaustiedot, 5-9/2004.
- 32 Böstman Ralf, verkostoasiantuntija Helen Verkko / verkoston kehitys – jäähdytysjärjestelmien toteutus ja käytännön kokemuksia 8/2004.

- 
- 33 Hyvönen Petri, tekniikan lisensiaatti – useita keskusteluita osittaispurkausmittauksista Helsingin Energialla ja Teknillisessä korkeakoulussa 2004.
- 34 Aroranta Mauri, kunnonvalvonta teknikko, Fortum Service – useita keskusteluja kaasun kehityksestä muuntajaöljyssä 2004.
- 35 Asaad A. Elmoudi, tutkija, Helsinki University of Technology – keskustelu Pasilan särövirtojen vaikutuksista muuntajahäviöihin 14.9.2004.
- 36 Takki Pekka, kehitysinsinööri, Helen Lämpö – maanalaisen sähköaseman jäähdytysjärjestelmän esisuunnittelua syyskuussa 2004.
- 37 Riipinen Marko, yksikön päällikkö, Helen Jäähdytys – Tarjous maanalaisen sähköaseman jäähdytyksestä kaukokylmällä syyskuussa 2004.
- 38 Saviniemi Antti, verkkopäällikkö, Helen Lämpö – Kaukokylmäjäähdytyksen esisuunnittelua syyskuussa 2004.



***Liitteet***

1. Mittausjärjestelyt Pasilan sähköaseman päämuuntajille 9 s.....	87
2. Valvomokuvia mittauksia varten tehdyistä kytkennöistä 2 s.....	96
3. Kysymyksiä Pasilan muuntajien valmistajalle 4 s.....	98
4. Helsingin Energian eristeöljytutkimuksia 2003 1 s.....	102

MITTAUSJÄRJESTELYT SÄHKÖASEMAN PÄÄMUUNTAJILLE

Jussi Palola

1.	JOHDANTO	2
	1.1 Minne mittauksia asennetaan	2
	1.2 Lämpötilojen mittaustietoja 2003	2
	1.3 Kaasuanalyysi 2003	3
2.	MITTAUSJÄRJESTELYT	5
	2.1 Lämpötila-antureiden paikat	5
	2.2 Mittauslaitteisto	8
3.	KUSTANNUKSET	9

## 1. JOHDANTO

LIITE 1 2/9

### 1.1 Minne mittauksia asennetaan

Yksityiskohtaisen tiedon saamiseksi tehdään mittausjärjestelyt kustannuksista riippuen yhdelle tai kahdelle sähköasemalle. Ensisijainen mittauskohde on Pasilan aseman toinen päämuuntaja; 2003 vuoden virtojen perusteella muuntajaa kuormitetaan keskiarvoisesti 42 % nimellisvirralla.

Pasilan päämuuntajia jäähdytetään pakotetulla öljy- ja ilmakierrolla. Lähes kaikki mittaukset ovat lämpötilamittauksia, ilmanvirtausta arvioidaan valmistajan antamilla oletusarvoilla ja käyttöönottokokeista saaduilla mittaustiedoilla.

### 1.2 Lämpötilojen mittaustietoja 2003

*Taulukko 1 Vuoden 2003 SCADA -järjestelmän mittaustiedoista laskettuja arvoja, jokaisen päämuuntajan nimellisarvojen mukaan.*

<b>Muuntaja</b>		<b>Käämin lämpötila (°C)</b>		<b>Öljyn lämpötila (°C)</b>		<b>Kuormitusaste</b>	
		<b>max</b>	<b>KA</b>	<b>max</b>	<b>KA</b>	<b>max</b>	<b>KA</b>
Kamppi M1	(OFAF)	76	48	52	41	105 %	48 %
Kamppi M2	(OFAF)	82	51	55	42	94 %	46 %
Myllypuro M1	(ONAF)	91	39	71	0	102 %	31 %
Myllypuro M2	(ONAF)	102	46	80	39	109 %	39 %
Pasila M1	(OFAF)	80	47	58	41	94 %	37 %
<b>Pasila M2</b>	<b>(OFAF)</b>	<b>86</b>	<b>55</b>	<b>64</b>	<b>48</b>	<b>101 %</b>	<b>42 %</b>
Viikimäki M3	(ONAF)	102	38	75	30	114 %	36 %
Pitäjänmäki M1	(ONAF)	88	54	79	49	92 %	44 %
Pitäjänmäki M2	(ONAF)	79	48	58	42	95 %	31 %
Pitäjänmäki M3	(ONAF)	55	8	40	8	97 %	4 %
Suurmetsä M1	(OFAF)	88	37	62	32	106 %	28 %
Suurmetsä M2	(OFAF)	82	27	65	25	83 %	18 %

Tällä hetkellä scada -järjestelmään tulee muuntajan lämpötilan mittaustiedot kahdeltatoista sähköasemalta. Kaikilta 20 sähköasemalta nämä mittaukset ovat tuotavissa scada -järjestelmään noin 40-90 työtunnin panoksella, riippuen siitä ovatko mittauskaapelit viety ristikytkentäkaapille relehuoneeseen, ja onko kaukokäyttöyhteydessä tilaa lämpötilan mittaustiedoille. Esimerkiksi Tapanilan päämuuntajien lämpötilatiedot ovat lisättävissä helpommin kaukokäyttöjärjestelmään, sillä asemalla on vapaita yhteyksiä tätä tarkoitusta varten.



### 1.3 Kaasuanalyysit 2003

LIITE 1 3/9

Fortumin Servicen tekemästä kaasuanalyysistä 22.12.2003:

Pasila, M1,

Valm. EBG, valm. vuosi 2000, valm. no: N4535101, Teho 40 MVA, 115/21 kV. Hiilimonoksidipitoisuus (CO) määritettiin arvoksi 552 µl/l (TCG = 574 µl/l). CO pitoisuus on lähes tasoittunut, mutta CO<sub>2</sub>- pitoisuus on lievässä kasvusuunnassa. Kasvunopeus selviää liitteen 1 sivun 4 kuvista (samoissa kuvaajissa myös Pasilan M2 muuntajan käyrät) niin pitoisuuden, kuin kehitysnopeuksienkin muuttumisena. Muuntajan kuormitus on ollut tosin vain 40...60 % luokkaa, joten kuormituksen nostaminen muuttanee tilannetta. Tästä syystä kaasupitoisuuksien seuranta öljynäytteistä on edelleen hyvin tarpeellinen.

Pasila, M2,

Valm. EBG, valm. vuosi 2000, valm. no: N4535102, Teho 40 MVA, 115/21 kV. Hiilimonoksidipitoisuus (CO) määritettiin nyt arvoksi 690 µl/l (TCG = 714 µl/l), joka on suurimmillaan määritetty jopa 1238 µl/l. Tämä on uudelle muuntajalle korkea arvo. CO- pitoisuuden vaihteluväli on suhteellisen suuri. CO<sub>2</sub>- pitoisuus näyttää ainakin hetkeksi tasoittuneen. Kasvu- ja muutosnopeus selviää liitteen 1 sivun 4 kuvista (samoissa kuvaajissa myös Pasilan M1 muuntajan käyrät) niin pitoisuuden, kuin kehitysnopeuksienkin muuttumisena. Tämänkin muuntajan kuormitus on ollut vain 40...60 % luokkaa, joten kuormituksen nostaminen muuttanee tälläkin muuntajalla tilannetta. Tästä syystä kaasupitoisuuksien seuranta öljynäytteistä on edelleen yhtä tarpeellinen, kuin Pasilan muuntajalla M1.

## Pasilan päämuuntajien hiilioksidien kehitys

LIITE 1 4/9

Mauri Aroranta

17.12.2003

MNT-161

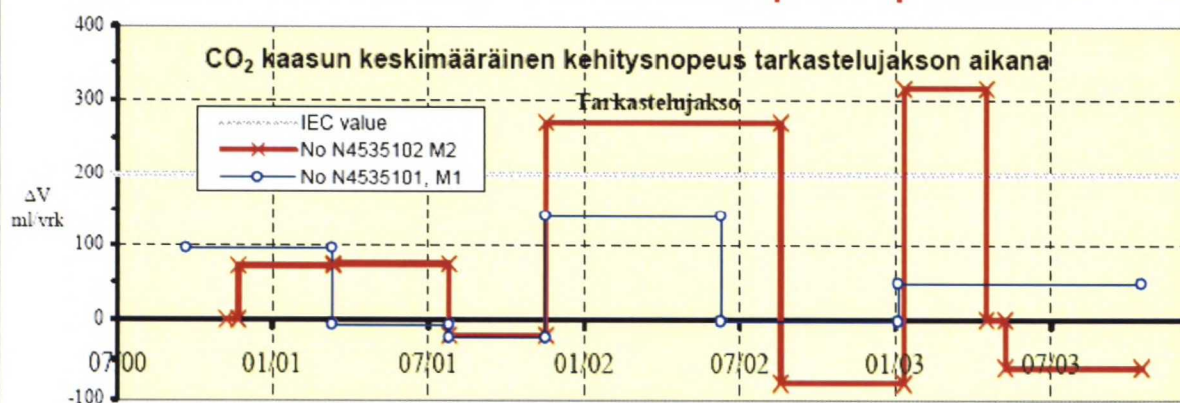
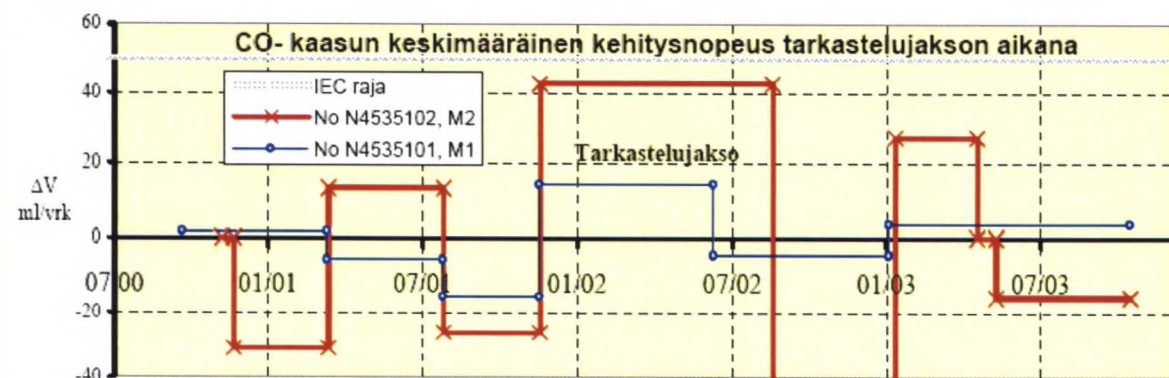
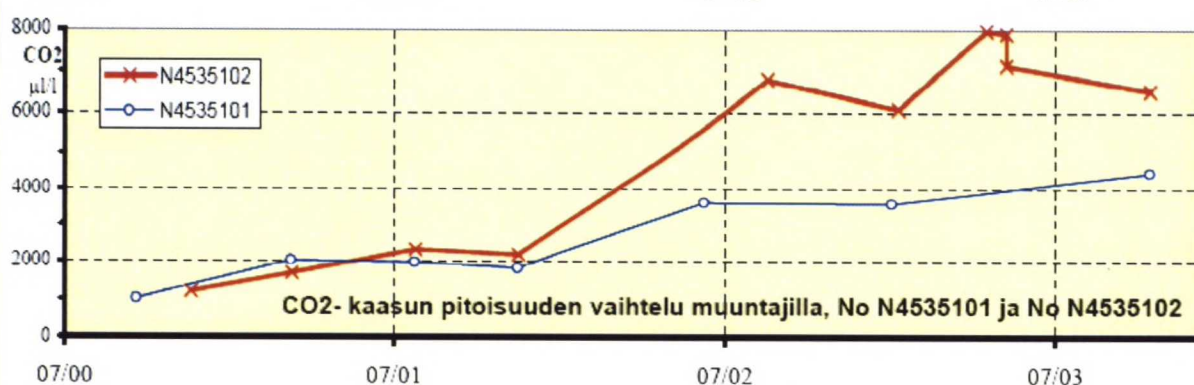
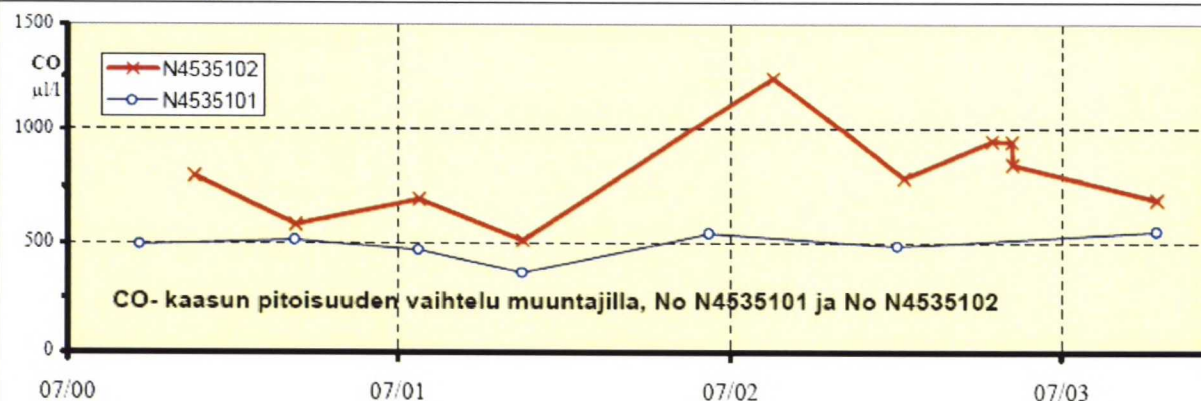
Vikakoodin saaneiden muuntajien viimeaikaiset kaasupitoisuudet ja -kehitykset

Seuraavassa on käsitelty molempia Pasilan muuntajia M1 ja M2

9) 11 (CO ylittää tarkkailurajan), Pasila, M1, EBG, DOR 56000/110, no N4535101, vv. 2000

 $dV/V_{CO} = 4$  ml/vrk, kahden viimeisimmän näytejakson välillä, n. 9,5 kk

10) 11 (CO ylittää tarkkailurajan), Pasila, M2, EBG, DOR 56000/110, no N4535102, vv. 2000

 $dV/V_{CO} = -16$  ml/vrk, kahden viimeisimmän näytejakson välillä, n. 5 kk



## 2. Mittausjärjestelyt

LIITE 1 5/9

### 2.1 Lämpötila-antureiden paikat:

Tärkeimmät mittaustiedot ovat sisään ja ulostulevan muuntajaöljyn lämpötila.

1. 1 öljytasku mutkaan
2. 4 eristettyä pintalämpötilan mittaajaa öljyputkiin
3. 2 muuntajahuoneen ilman lämpötila mittausta
4. 1 sisään menevän jäähdytysilman lämpötila
5. 2 radiaattorista ulostulevan ilman lämpötilan mittaus
6. 1 Virtausmittaus jäähdytysöljyn putkesta

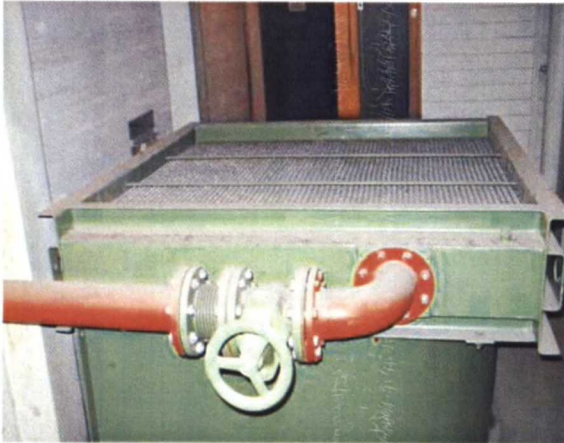


1. Mutkaan asennetaan öljytasku mittaamaan lämpötilaa putken sisältä. Päälle asennetaan myös yksi pintalämpötilamittaus, jotta voidaan laskea näissä mittauksissa käytettyjen pintalämpötilamittauksen aikavakio.

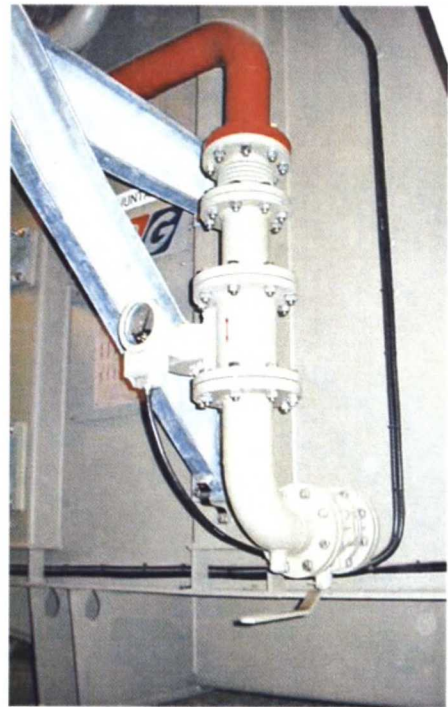


## 2.1.1 Pintälämpötila-antureiden paikat (4)

LIITE 1 6/9



Radiaattorista ulostulevan öljyn lämpötila



Muuntajaan sisään menevän öljyn lämpötila



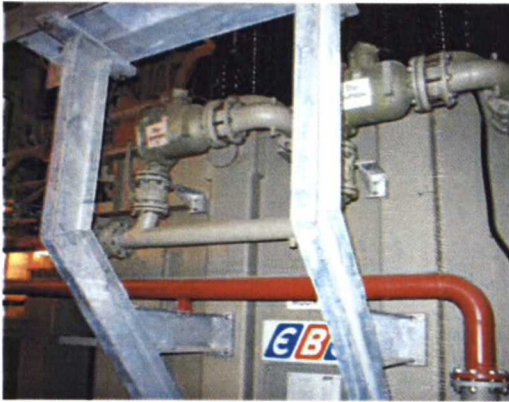
Muuntajasta ulos tulevan öljyn lämpötila



Radiaattoriin sisään menevän öljyn lämpötila

### 2.1.3. Ilman lämpötilamittaukset

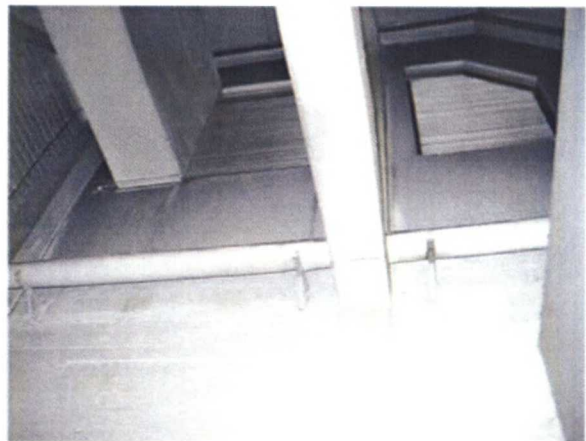
LIITE 1 7/9



Muuntajahuoneen lämpötila mitataan kahdesta kohtaa: puolivälistä ja yläkannen tasolta muuntajan lakikorkeudesta. Mittausanturit asennetaan sivuttaissuunnassa noin metrin etäisyydelle muuntajasta.



Radiaattoreihin menevän ilman lämpötila mitataan kohtisuorasti metrin etäisyydeltä ritilästä, minkä kautta ulkoilma tulee.



Radiaattoreista poistuvan ilman lämpötila mitataan noin metri ilmanpoistoritilöiden alapuolelta.



Radiaattori huoneen ilmanlämpötila mitataan sivuttaissuunnassa 1,5 metrin etäisyydeltä radiaattorista noin metrin korkeudelta.

2.2 Mittauslaitteisto

LIITE 1 8/9

TARJOUS 25.2.2004  
18.02.2004 1/1  
Viitteenne JUSSI PALOLA

Tilaaja  
Helsingin Energia  
00090 Helen

Toimitus  
Helsingin Energia  
VERKKO

		Kuljetustapa	Soveltuvin	
Nimike	Määrä	A-hinta	Yhteensä	
1. MX100.001 YOKOGAWA DAQMASTER MX100	1 kpl	1.723,00	1.723,00	
2. MX110.001 ANALOGIAMITTAUSKORTTI 10 KAN.	2 kpl	1.221,00	2.442,00	
3. MX150.001 POHJALEVY MX100 3 MODUULILLE	1 kpl	238,00	238,00	
4. MAS 0304021 SEINÄKOTELO	1 kpl	69,00	69,00	
5. ASENNUS MS KOTELOINTI	1 kpl	150,00	150,00	
6. MUUT KOMPONENTTI -				
Panta-anturi PT100 + nappilähetin kotelo 96x64x57mm Putki 114 mm	10 kpl	200,00	2000,00	
Suojatasku teräs+PT100+ nappilähetin + kotelo Putki 114 mm	2 kpl	400,00	800,00	
Ilmanlämpötilanturi PT100 Anturi PT100+Kotelo 96x64x57mm+nappilähetin	8 kpl	200,00	1600,00	
Veroton summa EUR			9.022,00 =====	
7. Eletta 4-20mA virtausmittari näytöllä Malli A5-FA125	2 kpl	1698,00	3396,00	



### 3. Kustannukset

LIITE 1 9/9

Yhdelle muuntajalle:

Virtamittarin asennus	24 tuntia * 2 miestä * 42,5€/t	2000 €
Lämpöantureiden asennus	16 tuntia * 2 miestä * 42,5€/t	1400 €
Öljytaskun asennus		300 €
Laitteisto		5600 €
	YHTEENSÄ:	9300 €

Kustannukset mittausjärjestelyistä Pasilan molemmille päämuuntajille:

Liikkuva mittauslaitteisto	9000 €
Jaetut kustannukset 2/3-osaa	-6000 €
Virtausmittarit	3400 €
Asennuskustannukset	
Lämpötila-anturit	2900 €
Virtausmittarit	4000 €
Öljytaskut	500 €

---

**Kahdella virtausmittarilla      yhteensä:      13800 € VALITTU**

Vain yhdellä virtausmittauksella yhteensä: 10100 €

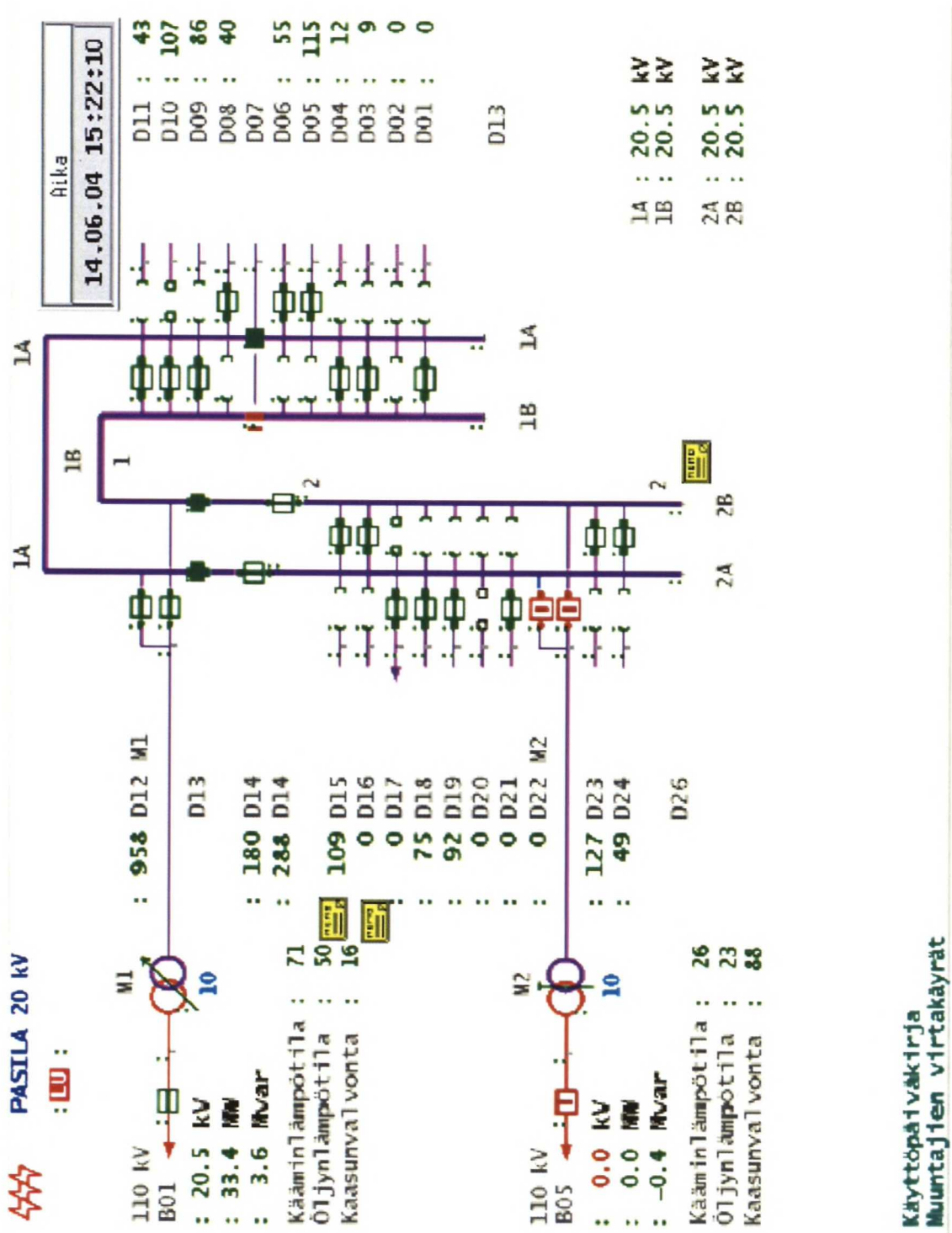
Ilman virtausmittaria      yhteensä: 6400 €

#### Alustava aikatalu keväälle 2004

- Viikko 9-10 kustannuspäätökset
- Viikko 11 laitteistohankinnat
- Viikko 12-13 toimitukset
- Viikko 14 asennukset

----> 2.4 käyttöönotto

Kuva 1 Sähkövalvomon näkymä Pasilan sähköasemalta kuormitushäviömittausten aikana.







## Kysymyksiä muuntajien valmistajalle

LIITE 3 1/4

1. Mikä on päämuuntajan suosituskäyttölämpötila, ja mihin se perustuu?  
Muuntajan käyntilämpötilaa voi jäähdytysjärjestelmän ohjauksesta riippuen muuttaa. Eri valmistajien suositukset vaihtelevat ja haluamme löytää juuri optimaalisen käytön Pasilan päämuuntajille.
2. Miten eri häviöt käyttäytyvät lämpötilan funktiona?  
Optimaalista tilannetta mallintaessa tarvitaan yksityiskohtaisempaa tietoa kuormitushäviöiden käyttäytymisestä lämpötilan funktiona.  
Onko valmistajalla tutkimustuloksia aiheesta?
3. Millaisia rakennetietoa käämien jäähdytyskanavista/tankin sisältä saa?  
Pasilan päämuuntajien jäähdytysjärjestelmän mittaustuloksista voidaan havaita aikavakion olevan suuri, ja etsimme tarkempia syitä tähän; onko se muuntajatankin sisällä vai jäähdytysjärjestelmässä.

Liitteenä on muutama esimerkki Pasilan sähköaseman päämuuntajien jäähdytysjärjestelmän mittaustuloksista:



PasilaM1-loading-te  
mp.JPG (57 ...



PasilaM1-Temp.JPG  
(57 kt)



PasilaM2-loading-te  
mp.JPG (57 ...



PasilaM2-Temp.JPG  
(51 kt)



Pasila-Oil Flow.JPG  
(47 kt)

Kysymyksessä ovat muuntajat:

### Pasila M1

Valmistusnumero: **N4535101**  
Valmistusvuosi: 2000  
Nimellisteho (MVA): 40,0

Valmistaja: EBG  
Öljynlaji: NYTRO 10X  
Öljyn määrä (kg): 14000

### Pasila M2

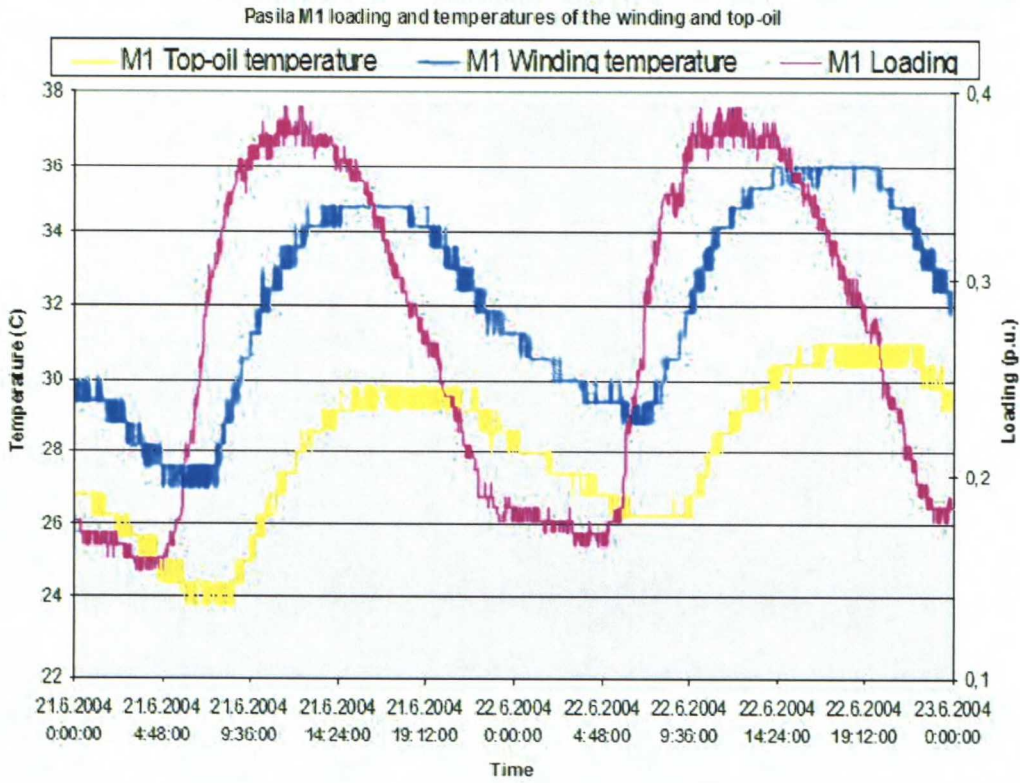
Valmistusnumero: **N4535102**  
Valmistusvuosi: 2000  
Nimellisteho (MVA): 40,0

Valmistaja: EBG  
Öljynlaji: NYTRO 10X  
Öljyn määrä (kg): 14000

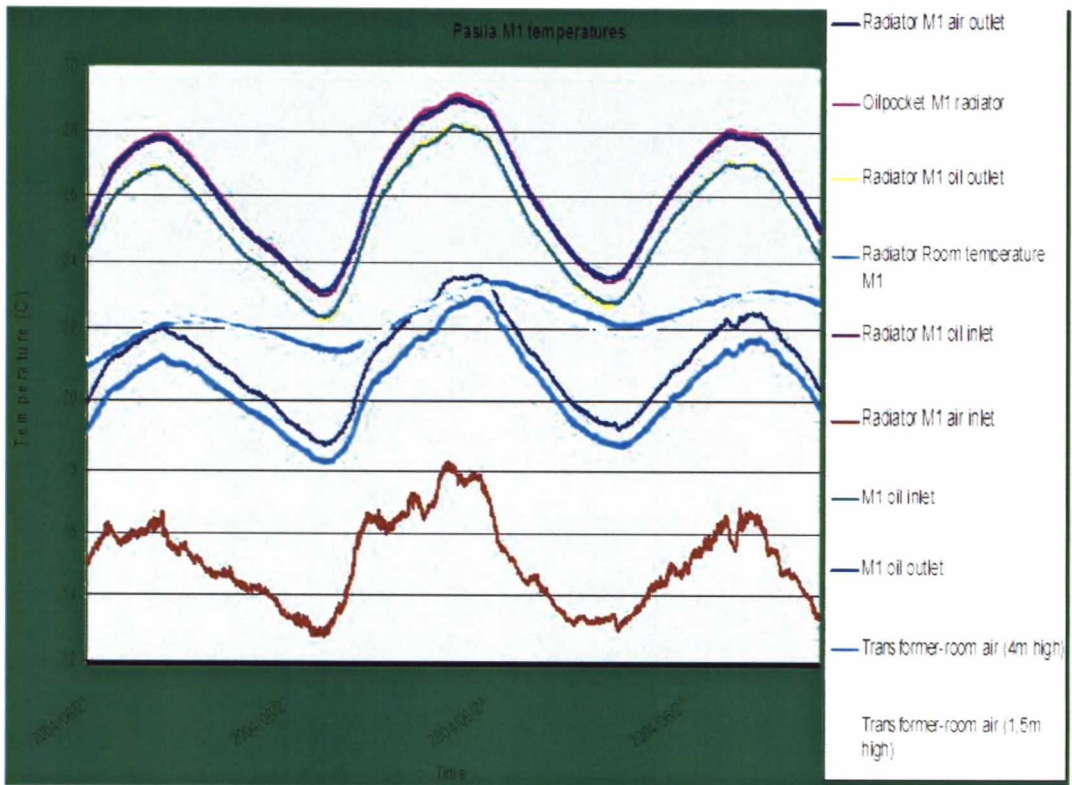
Jussi Palola.  
Helsingin Energia  
Verkon kehitys  
09-6172534 / 040-7592709

Kuva 1 Pasilan päämuuntajan M1 kuormitus ja öljyn lämpötila sekä käämin lämpötilakuvaaja.

LIITE 3  $\frac{2}{4}$



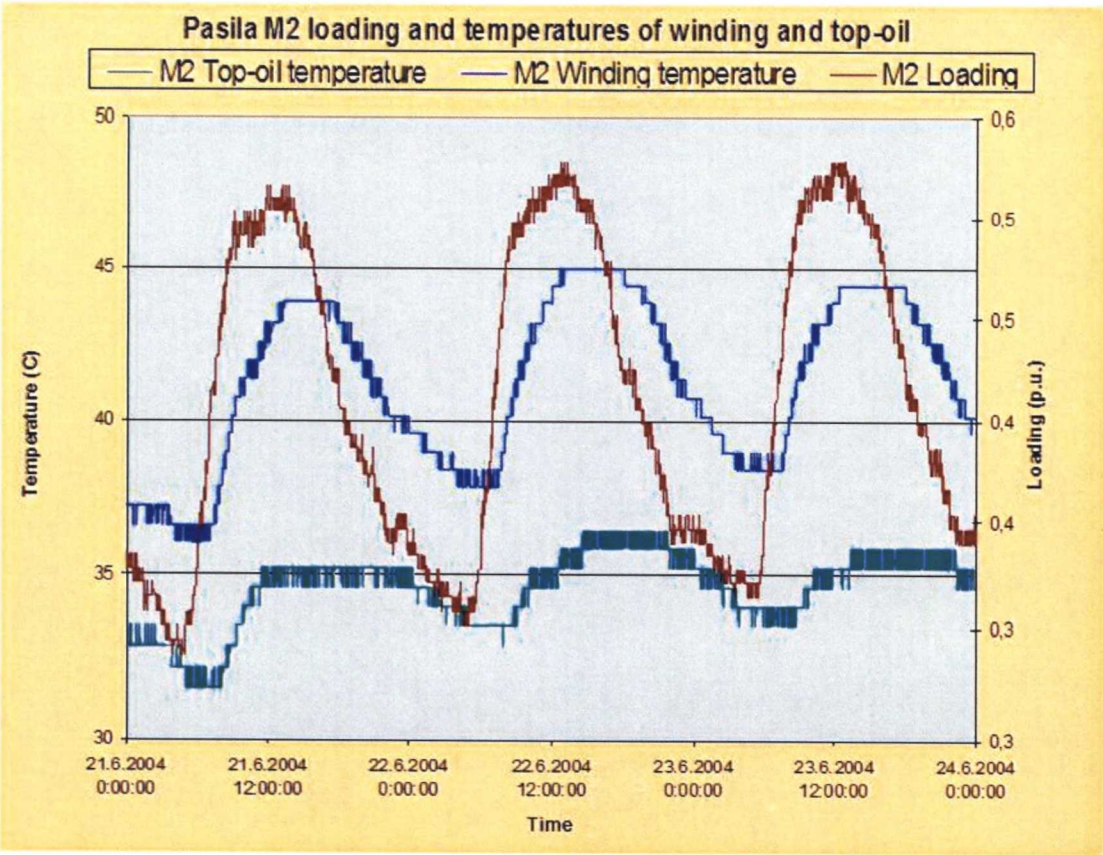
Kuva 2 Pasilan paikallisen mittausjärjestelmän mittaustietoa.



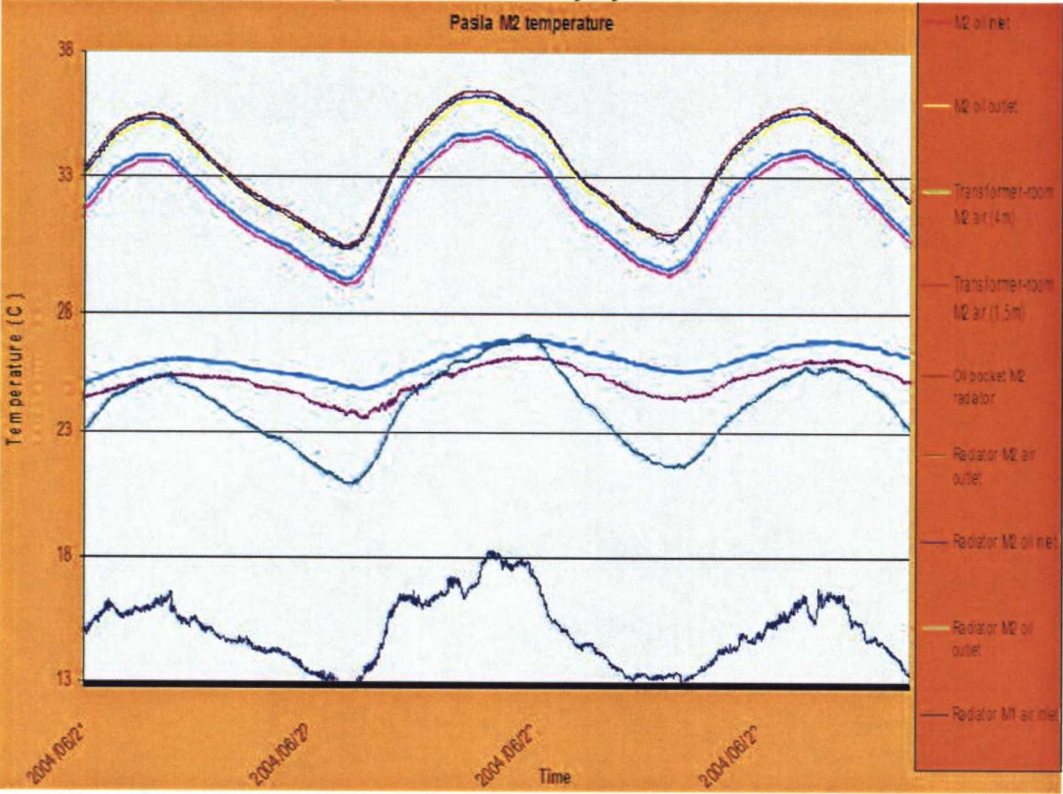


Kuva 3 Pasilan päämuuntajan M2 kuormitus ja öljyn lämpötila sekä käämin lämpötilakuvaaja.

LIITE 3  $\frac{3}{4}$



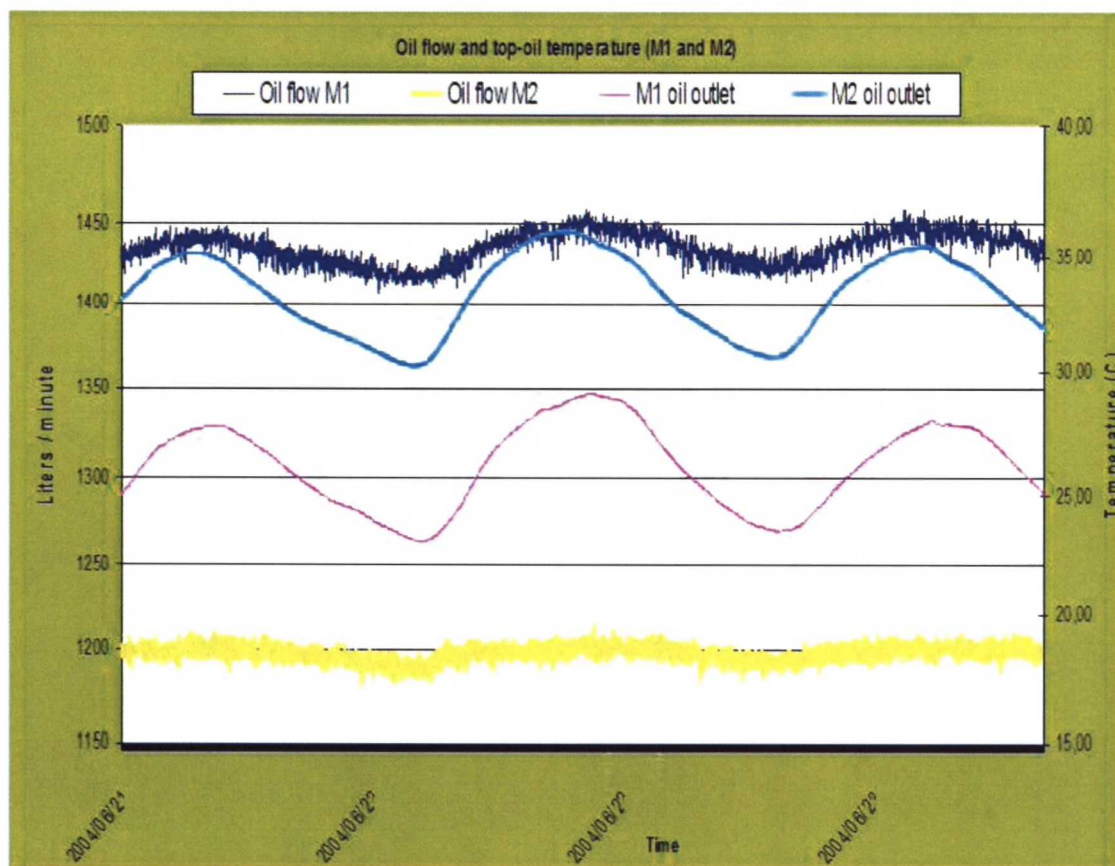
Kuva 4 Päämuuntajan M2 paikallisen mittausjärjestelmän mittaustietoa.





Kuva 5 Öljyn virtausnopeus ja huippuöljyn lämpötila molemmilla  
Pasilan muuntajilla.

LIITE 3  $\frac{4}{4}$



Taulukko 1 Fortum Servicen kaasuanalyysin tulokset Pasilan päämuuntajalta M1

LIITE 4

Pasila M1		Kaasupitoisuudet: kaasutilavuus/öljytilavuus										
		H <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	TCG	Vika
Työ	Analyyysi	Vety	Hap-pi	Typ-pi	Me-taani	Hiili-mon.	Hiilidio.	Ety-leeni	Etaani	Asety-leeni	Palavat k.	Tyyppi
no	pvm	µl/l	ml/l	ml/l	µl/l	µl/l	µl/l	µl/l	µl/l	µl/l	µl/l	
141	5.7.2002	24	27	69	4,6	541	3607	0,0	0,0	0,0	569	11
16	29.1.2003	16	28	67	4,1	486	3585	0,0	0,0	0,0	506	0
227	11.11.2003	17	21	54	4,3	552	4443	0,0	0,0	0,0	574	11
82	12.5.2004	21	25	65	4,8	580	4872	7,3	1,5	0,0	615	11
97	3.6.2004	24	26	67	5,3	656	5155	8,0	1,5	0,0	695	11
105	11.6.2004	24	25	65	5,0	613	4504	7,6	1,4	0,0	651	11
145	11.8.2004	16	28	67	4,7	524	4470	8,1	1,5	0,0	554	11
Suositus		≤ 100			≤ 100	≤ 500	≤ 10000	≤ 150	≤ 100	≤ 10		

Taulukko 2 Kaasuanalyysin tulokset Pasilan päämuuntajalta M2

Pasila M2		Kaasupitoisuudet: kaasutilavuus/öljytilavuus										
		H <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	TCG	Vika
Työ	Analyyysi	Vety	Hap-pi	Typ-pi	Me-taani	Hiili-mon.	Hiilidio.	Ety-leeni	Etaani	Asety-leeni	Palavat k.	Tyyppi
no	pvm	µl/l	ml/l	ml/l	µl/l	µl/l	µl/l	µl/l	µl/l	µl/l	µl/l	
103	4.6.2003	28	21	63	7,2	946	7900	0,0	1,4	0,0	983	11
103	4.6.2003	26	21	65	6,5	845	7115	0,0	1,2	0,0	879	11
227	11.11.2003	17	20	56	5,8	690	6523	0,0	1,1	0,0	714	11
78	12.5.2004	20	24	63	5,5	641	6689	21	2,3	0,0	690	11
97	3.6.2004	24	24	64	5,5	666	6622	22	2,2	0,0	719	11
105	11.6.2004	22	26	68	5,9	699	6581	23	2,3	0,0	751	11
145	11.8.2004	20	25	64	5,2	572	6216	24	2,3	0,0	623	11
Suositus		≤ 100			≤ 100	≤ 500	≤ 10000	≤ 150	≤ 100	≤ 10		

**Vikatyyppit:**

0 ei vikaa, 1 pienitehoisia osittaispurkauksia, 2 suuritehoisia osittaispurkauksia, 3 pienitehoisia purkauksia,

4 suuritehoisia purkauksia, 5 terminen vika &lt; 150 C, 6 terminen vika 150...300 C, 7 terminen vika 300...700 C,

8 terminen vika &gt; 700 C, 9 ei määriteltävissä, 10 öljyn/paperin arvo ei täytä suositusta ks. huom!, 11 terminen vika tai öljyn/paperin vanheneminen, 12 ei automaattisesti määritettävissä ks. huom!.